

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Katedra výkonové elektroniky a strojů

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Přehled bateriových akumulčních systémů pro energetická úložiště

Autor práce: **Ondřej Filař DiS.**
Vedoucí práce: **Ing. et Ing. Martin Vinš**

2021/2022

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2021/2022

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

Jméno a příjmení: **Ondřej FILAŘ**
Osobní číslo: **E18B0008K**
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Téma práce: **Přehled bateriových akumulčních systémů pro energetická úložiska**
Zadávací katedra: **Katedra výkonové elektroniky a strojů**

Zásady pro vypracování

Vypracujte přehled bateriových akumulčních systémů vhodných pro energetická úložiska.

1. Popište princip funkce jednotlivých bateriových akumulčních systémů.
2. Popište jejich výhody, nevýhody a zhodnoťte použitelnost v energetických úložiscích.
3. Uveďte jejich aktuální technické parametry a dostupnost.
4. Porovnejte vzájemně jejich dynamické vlastnosti.

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

Seznam doporučené literatury:

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

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Martin Vinš**
Katedra výkonové elektroniky a strojů

Datum zadání bakalářské práce: **8. října 2021**
Termín odevzdání bakalářské práce: **26. května 2022**


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



Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 8. října 2021

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá bateriovými systémy vhodnými pro velká energetická uložení. Bateriové systémy jsou zde rozděleny podle toho, z jakých materiálů jsou vyrobeny. V první části jsou popsány bateriové systémy, které využívají jiné než lithiové elektrody. Další část je věnována lithiovým bateriovým systémům a třetí průtokovým bateriím, na konci kapitol jsou jednotlivé technologie porovnány mezi sebou. Ve čtvrté části bakalářské práce je pak určen úroveň technologické připravenosti jednotlivých systémů. Poslední kapitola je věnována porovnání technologií na základě jejich dynamických vlastností.

Klíčová slova

Akumulace elektrické energie, bateriová uložení, bateriové systémy, dynamické vlastnosti baterií, lithiové baterie, olovené baterie, on-grid systém, průtokové bateriové systémy, uložení elektrické energie, úroveň technologické připravenosti

Abstract

This bachelor thesis is focused on battery systems suitable for the storage of energy. Battery systems are here divided into sections on which types of materials are used in a battery. The first part of this thesis is focused on batteries that use different types of materials than lithium. The next one is focused on battery systems that are using lithium and the third one is about flow batteries, on the end of each section there is compare of types between each other. In the fourth section of bachelor thesis is focused on determination of technology readiness level for each type of system. Last section is to compare technologies on their dynamic properties.

Key Words

Electricity storage, battery storage, battery systems, dynamic properties of batteries, lithium batteries, lead batteries, on-grid system, flow-through battery systems, electricity storage, level of technological readiness

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software použitý při řešení této bakalářské práce je legální.

.....

Podpis

Poděkování

Rád bych poděkoval panu Ing. et Ing. Martinu Vinšovi za pomoc a věcné připomínky při vypracování této bakalářské práce. Dále pak mým rodičům za podporu, které se mi od nich vždy dostalo a v neposlední řadě mému manažeru Ing. Stanislavu Staňkovi za jeho vstřícný přístup při mém studiu.

Obsah

Úvod.....	- 1 -
1 Elektrická baterie.....	- 2 -
2 Technologie bez použití lithia	- 3 -
2.1 Olovnaté baterie	- 3 -
2.1.1 Srovnání jednotlivých typů olovených akumulátorů.....	- 6 -
2.2 Nikl kadmium – Ni-Cd.....	- 7 -
2.2.1 Nikl-metal-hydride Ni-MH.....	- 8 -
2.2.2 Srovnání Nikl akumulátorů.....	- 9 -
2.3 Sodíkové akumulátory.....	- 10 -
2.3.1 Sodíko-sírové baterie NaS	- 10 -
2.3.2 Sodík-nikl-chlorid baterie NiCl ₂	- 12 -
2.4 Sodium-ion akumulátory.....	- 12 -
2.5 Srovnání vlastností probraných baterií.....	- 13 -
3 Lithiové baterie.....	- 15 -
3.1 LCO – lithium cobalt.....	- 18 -
3.2 LTO – lithium Titan oxide	- 19 -
3.3 LMO – Lithium manganese	- 19 -
3.4 NMC – Lithium nickel manganese cobalt.....	- 20 -
3.5 LFP – Lithium iron phosphate	- 20 -
3.6 NCA – Lithium nikl kobalt aluminium.....	- 21 -
3.7 Li-S - lithium síra	- 21 -
3.8 Li-S s nano vlákny.....	- 22 -
3.9 LiC Lithium-iontový kondenzátor	- 23 -
3.10 Srovnání Lithiových baterií.....	- 24 -
4 Redux Flow Batteries	- 26 -
4.1 VRBF	- 27 -
4.2 ZBFB.....	- 29 -
4.3 Polysulfid brom.....	- 29 -
4.4 Li-RFB	- 30 -

4.5 Srovnání Redux Flow baterií.....	- 31 -
5 Určení technologické připravenosti systémů.....	- 33 -
6 Porovnání dynamických vlastností.....	- 36 -
6.1 Pb-acid.....	- 36 -
6.2 NaS.....	- 37 -
6.3 Li-ion.....	- 39 -
Zhodnocení a závěr.....	- 40 -
Literatura.....	- 41 -
Seznam tabulek.....	- 48 -
Seznam obrázků.....	- 49 -

Seznam symbolů a zkratek

Wh	watthodina	(Wh)
I	elektrický proud	(A)
t	Teplota	(°C)
p	Tlak	(Pa)
R	Odpor	(Ω)
U	Napětí	(V)
E _g	Gravimetrická hustota energie	(Wh/Kg)
BESS	Battery Energy Storage System	
UPS	Uninterruptible Power Supplies	
VRLA	Valve Regulated Lead Acid	
SLA	Sealed Lead-acid Battery	
AGM	Absorbed Glass Mat	
GEL	Gel Cell	
DoD	Depth of Discharge	
NaS	Sodík-síra	
SoC	Stav nabití	
POD	Proper Orthogonal Decomposition	
FVM	Finite-Volume Method	
LiS	Lithium-sírová baterie	
Li-Ion	Lithium-iontová baterie	
LIC	Lithium-iontový kondenzátor	
RFB	Redux Flow Batteries	
li-RFB	Lithium-iontová redoxní průtoková baterie	
SoC	State of charge	

Úvod

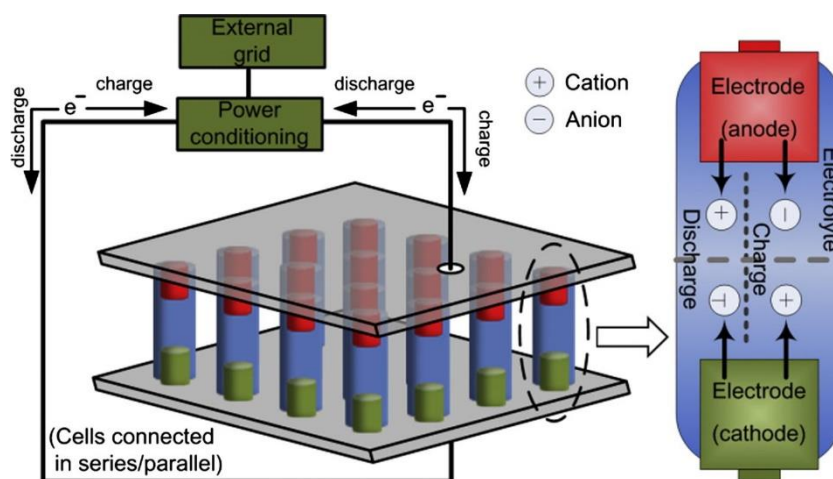
O tom, že některé materiály v sobě mají volný náboj, se začalo uvažovat již v 18. století, kdy profesor Luigi Galvani začal experimentovat s nožkami žab a měděnými drátky. Následně pak přišly objevy Alessandra Volty, které již byly reálnou kolébkou elektrických článků. Dnes více než kdy dříve je třeba se zaměřit na výzkum a bádání v tomto odvětví. Hlavním důvodem, proč hrají a budou hrát baterie a bateriové systémy v naší budoucnosti velkou roli, a to nejen z nárůstu komerční elektroniky a elektromobilů, ale z nutnosti skladovat elektrickou energii. A to v důsledku rostoucího využití nejen v oblasti elektromobily, která je aktuálně vnímána jako volný nástupce konvenčních spalovacích motorů, ale také v energetice. Právě v oblasti energetiky existuje značný prostor pro aplikace s nestálou výrobou elektrické energie, kde jde primárně o solární panely, větrné elektrárny a další. U těchto alternativních zdrojů je problematické, že elektrická energie není k dispozici ve chvílích, kdy je nejvíce potřebná, jestliže není systém napojen na akumulátor. Aktuálně není v našich silách poručit přírodním živlům, aby pružně reagovaly na naše přání ohledně dodávky elektrické energie. Vzhledem k tomu, že se v následujících letech předpokládá rozsáhlejší využití alternativních zdrojů pro výrobu elektrické energie, přichází na řadu bateriové systémy a velká úložiště elektrické energie. Úkolem předkládané práce je tedy vytvořit seznam aktuálně dostupných technologií, které se používají a vzájemně je porovnat, dále pak stanovit jejich TRL tedy úroveň technologické připravenosti, a to je provedeno na základě rozšíření technologie do komerčního prostředí.

1 Elektrická baterie

Jedná se o stejnosměrný zdroj elektrické energie, který je ve většině případů realizován z článků, jež jsou zapojeny buď sériově, nebo paralelně. Už od zapojení se odvíjí některé problémy, které je potřeba u bateriových systémů řešit. Jako například nabíjecí proudy, už ty budou v případě sériového zapojení problematické.

Další z věcí, které ovlivňují vlastnosti baterie, jsou použité materiály. Lithiové baterie se vlastnostmi liší od těch bez lithiových a naopak. To také ovlivňuje jejich následné aplikace, kdy lithiové baterie nejsou vhodné například na startování automobilů, protože jsou pro takové aplikace příliš drahé a tak jsou v této aplikaci upřednostněné olovených baterií vhodnější. Tyto principy fungují i naopak, kdy např. olovená baterie není vhodná pro napájení mobilních telefonů, laptopů a jiných přenosných zařízení. Dalším důvodem je i to, že u olovených baterií není předpokládáno její hluboké vybití, které pak snižuje její životnost. [1]

Také se v dnešní době lze setkat s průtokovými bateriemi, které místo spojení dvou pevných látek využívají tekutého elektrolytu, který stejně jako v předchozím případě funguje jako nosiče nabitých částic. Na Obr. 1 se nachází schéma bateriového systému, který je tvořen jednotlivými články, a jeho zapojení do distribuční sítě.



Obr. 1 Schéma provozu bateriového systému skladování energie. [1]

2 Technologie bez použití lithia

Technologie baterií, které využívají jiných materiálů než lithia, je celá řada jedná se jak o velmi rozšířené systémy, které již fungují desítky let, tak systémy, které jsou stále ve stádiu vývoje. Nelze proto říci, že by se jednalo o technologie, které by neměly budoucnost, naopak lze čekat nárůst například systémů které využívají snadno získatelných materiálů jako síra či sodík.

2.1 Olovnaté baterie

Akumulátory s olovenými články patří k nejstarším známým systémům k uchování elektrické energie, konkrétně byly objeveny fyzikem francouzského původu Gastonem Planté v roce 1859. Od té doby jsou hojně komerčně využívány, lze se s nimi setkat jak v automobilech s konvenčním spalovacím motorem, tak ve velkých BESS (Battery Energy Storage System), dále pak ve vysokozdvizných vozících, systémech UPS (Uninterruptible Power Supplies), lodích a invalidních vozících.

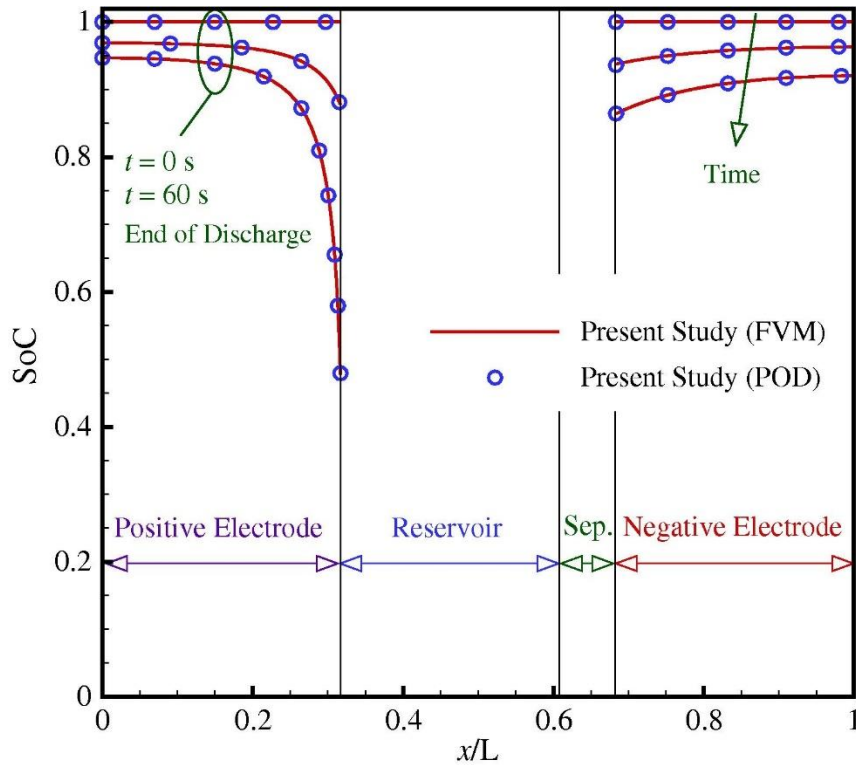
U BESS s využitím olovených akumulátorů jsou známé projekty například v Berlíně ve společnosti BEWAG 8,5 MWh. V Portorice od roku 2016 v závodě PERPA vzniká úložiště schopné dodávat energii 14 MW po dobu až 1,5 h. Největší doposud existující komplex úložiště elektrické energie se nachází v Číně v Chenu a je schopný dodávat 10 MWh po dobu až 4 hodin. Nejstarším takto instalovaným systémem je v americkém Phoenixu. [2]

Principem Pb-acid akumulátorů je kladná elektroda z oxidu olovnatého a záporné elektroda z porézního olova, k separaci těchto elektrod je použito mikroporézního materiálu polyolefinové pryskyřice. Celý systém je pak ponořený do elektrolytu kyseliny sírové.

V bateriích se zaplavenými elektrodami, kde je využito roztoku kyseliny sírové, se v průběhu vybíjení oxid olovnatý, který je na kladné elektrodě redukuje na oxid olovičitý. Ten reaguje s kyselinou sírovou a v důsledku toho vzniká síran olovnatý. Dále pak houbovitě olovo na záporné elektrodě oxiduje a vznikají ionty olova, ty reagují s kyselinou sírovou a vzniká síran olovnatý [2]. Při nabíjení akumulátoru pak dochází ke stejnému procesu, jen je reakce obrácená.

Při vybíjení nedochází ke změnám na katodě a anodě ve stejném poměru, v následujícím obr. 2 jsou vidět změny, ke kterým na elektrodách dochází v poměru hodnoty SoC. Je zde tedy zjevné dynamické chování oloveného článku při vybíjení, znázorněný je začátek vybíjení, $t = 60$ s a konec vybíjení. Dále je zřejmé, že ani katoda ani anoda nejsou využity rovnoměrně při vybíjení a ani jejich stav na konci vybíjení není stejný. Dále je zde vidět, že

při vybitém stavu není hodnota SoC nulová, to značí určitou hodnotu aktivních látek, která je v systému tudíž je zde ještě je nevyužitý náboj. [17]



Obr. 2 Využití elektrod v závislosti na vybíjení. [17]

Tento akumulátor je vhodný pro aplikace, kde je třeba velkého proudu po krátký čas a se zanedbatelným poklesem napětí mezi svorkami. To je způsobeno velmi malým vnitřním odporem. Akumulátor je tak schopný krátkodobě dodávat velmi vysoké proudy, což se pak využívá při startování spalovacích motorů.

Trakční akumulátor je vytvořený tak, aby měl co největší kapacitu a velký počet nabíjecích cyklů. Toho je dosaženo pomocí širokých elektrod. I pro tyto olověné baterie platí, že jejich životnost a maximální počet cyklů se bude odvíjet od hloubky vybití. Čím více bude baterie nabíjena z hlouběji vybitého stavu, tím kratší bude její životnost. U trakčních baterií se za ideálních podmínek pohybujeme okolo 1000 a více cyklů. [3]

V tabulce 1 se nachází porovnání těchto dvou typů akumulátorů, z toho je zřejmé, jak malý počet nabíjecích cyklů je na startovací baterii možný, proto také nemá pro systémy BESS téměř žádný význam a již se jimi dále nebudu zabírat.

Tabulka 1 Porovnání počtu cyklů pro startovací a trakční olověné baterie[3]

Depth of Discharge	Startovací baterie	Trakční baterie
100%	12–15 cyklů	150–200 cyklů
50%	100–120 cyklů	400–500 cyklů
30%	130–150 cyklů	1,000 cyklů a více

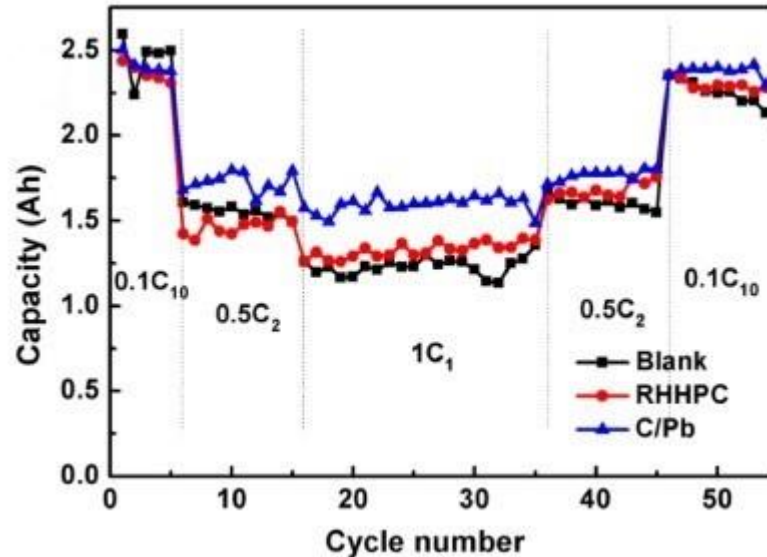
Klasický typ olověných akumulátorů musí mít větrací otvory na svém vrchní straně. Ty jsou zde nutné z důvodů přebíjení, kdy v baterii začne docházet k elektrolýze a vzniku plynů, konkrétně vodíku. Ten může navýšit tlak v jinak uzavřené baterii až do stavu, kdy dojde k jeho poškození. Z faktu že se na akumulátoru nachází větrací ventily, je patrné, že bude nutno akumulátory udržovat v kolmé poloze vůči zemi. To není vyhovující u všech aplikací a z toho důvodu se dnes používají bezúdržbové olověné akumulátory známé jako VRLA (Valve Regulated Lead Acid), také možné najít pod názvem SLA (Sealed Lead-acid Battery), které lze používat ve všech polohách a odpadá nutnost doplňování elektrolytu. Toho je dosaženo použitím jiné technologie. Pro bezúdržbové akumulátory platí, že jsou hermeticky uzavřené a neprovádí se tedy žádná údržba v podobě dolévání elektrolytu. Akumulátory typu VRLA jsou vybavené jednocestnými přetlakovými ventily, které se otevírají v rozmezí tlaků 10-40 kPa. Ty slouží k regulaci tlaku, který může při nabíjení narůst vlivem přebíjení a může dojít následně k poškození akumulátoru. [18]

Dále rozeznáváme rozdělení na základě použitého elektrolytu v akumulátorech – AGM (Absorbed Glass Mat) a GEL (Gel Cell). Tyto akumulátory nachází uplatnění jako záložní zdroje pro telekomunikační vysílače, banky, nemocnice a podobně. AGM olověná baterie se principově neliší od základního typu s olověnými elektrodami, rozdíl spočívá v elektrolytu. Konkrétně je použita tkanina ze skelných vláken, které jsou elektrolytem nasáklé. V GEL akumulátoru je použit elektrolyt ve formě gelu, ten opět od sebe odděluje elektrody. Gel je tvořen kyselinou sírovou a jemným křemičitým práškem, díky čemu získává gelovou konzistenci. [18]

Baterie lead-carbon je nejnovějším přírůstkem mezi olověnými akumulátory. Principiálně se jedná o stejnou baterii, jen je zde použito jiných materiálů pro zápornou elektrodu, konkrétně jde o olovo a nanouhlíková vlákna, která jsou do elektrody vetkána. Díky tomu se snižuje rychlost stárnutí akumulátoru a je zde dosaženo velkého počtu nabíjecích cyklů a až

3600 při 60 % nabitém stavu baterie. [4] Platí zde, že čím méně bude docházet k úplnému vybití baterie, tím delší bude její životnost.

Na obrázku [3] je vidět vliv počtu cyklů na kapacitu akumulátoru, jsou zde porovnané anodové materiály Blank, RHHPC, C/Pb.



Obr. 3 Hodnoty kapacit článků při rostoucím počtu cyklů [5]

2.1.1 Srovnání jednotlivých typů olověných akumulátorů.

V následujících odstavcích budou popsány výhody a nevýhody klasických akumulátorů se zaplavenými elektrodami, bezúdržbové baterie AGM, GEL akumulátory a lead-carbon baterie.

Klasické akumulátory se zaplavenými elektrodami – vysoká energetická účinnost, jedná se o parametr, který udává vztah mezi energií potřebnou k nabití akumulátoru a schopností akumulátoru naakumulovanou energii uvolnit, pro klasické olověné akumulátory je to okolo 85 %. Oproti bateriím AGM nejsou tak citlivé na přebíjení. Velmi malý vnitřní odpor kolem $0,001 \Omega$ na jeden článek, díky tomu jsou odolné vůči tepelným a proudovým výkyvům. Velmi dobrý poměr cena/výkon. Nevýhodou těchto baterií je jejich velká váha způsobená velkou hustotou olova $11 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ a velmi omezené počty cyklů. Jedná se o 400-800 cyklů, konkrétní počet se odvíjí od hloubky vybití, skladování a kvality zpracování. Další nevýhodou je nutnost kontrolovat hladinu elektrolytu a dolévat jej destilovanou vodou. Frekvence kontrol se odvíjí od doporučení výrobce, ale obecně se doporučuje jednou za dva měsíce. K úbytku elektrolytu dochází při činnosti baterie elektrolyzou, kdy je H_2O rozdělena na kyslík a vodík, dále pak přirozeným odparem vody. Pokud dojde k úplnému vybití, je třeba v rámci třech dní opětovně nabít, jinak hrozí permanentní ztráta schopnosti vázat elektrický náboj. Úplné vybití je stav, kdy je napětí na akumulátoru menší než 10,5V. [2; 3]

Bezúdržbové baterie AGM – jejich velkou výhodou je jejich dlouhá životnost, ta je ovlivněna tím, že baterie v porovnání s klasickou olověnou baterií nejsou citlivé na stav hlubokého vybití. To prodlužuje počet cyklů dvakrát až třikrát oproti klasické olověné baterii. Mezi nevýhody pak patří vyšší cena a větší náročnost nabíjení, kdy je třeba nepřekročit 14,6V, protože při tomto napětí začíná docházet k elektrolýze, tím by mohla být poškozená hermetická schránka baterie. Konkrétně pro AGM baterie by se nabíjecí napětí mělo pohybovat mezi 14,4-14,5V. Díky vysokému počtu cyklů a bezúdržbového typu baterie jsou AGM často používány u ostrovních elektráren či u solárních panelů jako napájení karavanů.

GEL akumulátory – výhodou těchto akumulátorů je jejich odolnost vůči změnám polohy, dále dobře snášejí i otřesy, hodí se proto do motocyklů, zemědělských strojů, vojenské techniky a terénních aut. Jsou také odolné vůči přehřívání, protože gel obsažený v těchto akumulátorech vede dobře teplo, může tedy dlouho pracovat za stabilních podmínek. Doba, po kterou může zůstat akumulátor ve vybitém stavu je delší, k poškození může dojít až za 28 dní. K nevýhodám těchto akumulátorů patří nižší měrná hustota energie, takže akumulátory jsou za cenu stejného elektrického náboje těžší oproti jiným olověným bateriím.

Lead-carbon baterie – hlavní výhodou je její počet cyklů, kterým násobně převyšuje i kvalitní trakční baterie. Také čas potřebný pro nabití baterie je menší než u klasických olověných článků. Nevýhodou je nutnost před uvedením do provozu několikrát plně akumulátor nabít a částečně vybit, čímž dojde k aktivaci materiálu. Pokud tak není učiněno, má baterie po zapojení menší kapacitu než jakou deklaruje výrobce. [2; 6]

2.2 Nikl kadmium – Ni-Cd

Základem těchto akumulátorů jsou články tvořené katodou a anodou. Kladná elektroda je z niklu a záporná elektroda z kadmia, obě tyto elektrody jsou umístěny stejně jako u olověných baterií do elektrolytu, ten tvoří zásaditý roztok hydroxidu draselného. Celý akumulátor, složený z jednotlivých článků, které lze otevřít, aby bylo možné dolít elektrolyt. Ten je částečně spotřebováván při nabíjení, kdy dochází k elektrolýze vody, která je obsažena v elektrolytu. Případně se můžeme setkat s akumulátory s tzv. vázaným elektrolytem, jež umožňuje hermetické uzavření baterií. [19]

Tento druh akumulátoru se nachází kromě energetických úložišť také v letadlech, elektrických vozících, lodích a dalších aplikacích. Velká výhoda oproti olověným akumulátorům spočívá v jeho váze. Ta je při porovnání gravimetrické hustoty energie větší

u Ni-Cd akumulátorů, konkrétně jde o hodnoty pro Pb-Acid 30-40 Wh/Kg a pro Ni-Cd 50-60 Wh/Kg. Co se počtů cyklů týče, tak při správně regulovaném vybíjení se jedná o 2000 cyklů a po celou dobu své životnosti si udržuje svoji kapacitu. Naopak nevýhodou těchto akumulátorů je toxicita kadmia, proto je nutné dbát na jejich správné skladování a likvidaci. Je nutné také zmínit cenu akumulátorů, jelikož ta může být až dvojnásobná v porovnání s Pb-acid akumulátory. [19; 3]

Další nevýhodou tohoto typu akumulátorů je tzv. paměťový efekt, k němuž dochází při částečném vybití akumulátoru, článek je schopen si při tomto částečném vybití „pamatovat“ nižší hladinu nabitého stavu a při jeho následném nabití na jmenovité hodnoty dojde k poklesu maximální kapacity. Tento jev vede k neúplnému využití aktivní plochy a vzniku velkých krystalů s malou aktivní plochou. Tomu lze předcházet pomocí řízeného vybíjení akumulátoru, kdy pravidelně dojde k úplnému vybití a při následném nabití vzniknou krystaly nové a s velkou účinnou plochou. [2]

2.2.1 Nikl-metal-hydride Ni-MH

Ni-MH akumulátory pracují v podstatě na stejném principu jako Ni-Cd. I v nich jsou dvě elektrody, z nichž jedna je kladná z niklu a záporná elektroda je zde tvořena kombinací kovových slitin a vodíkem, které dohromady vytváří směs hydridů. K jejich objevu došlo ve druhé polovině 20. století a největšího rozmachu se jim dostalo v 21. století, kdy začaly vytlačovat Ni-Cd akumulátory.

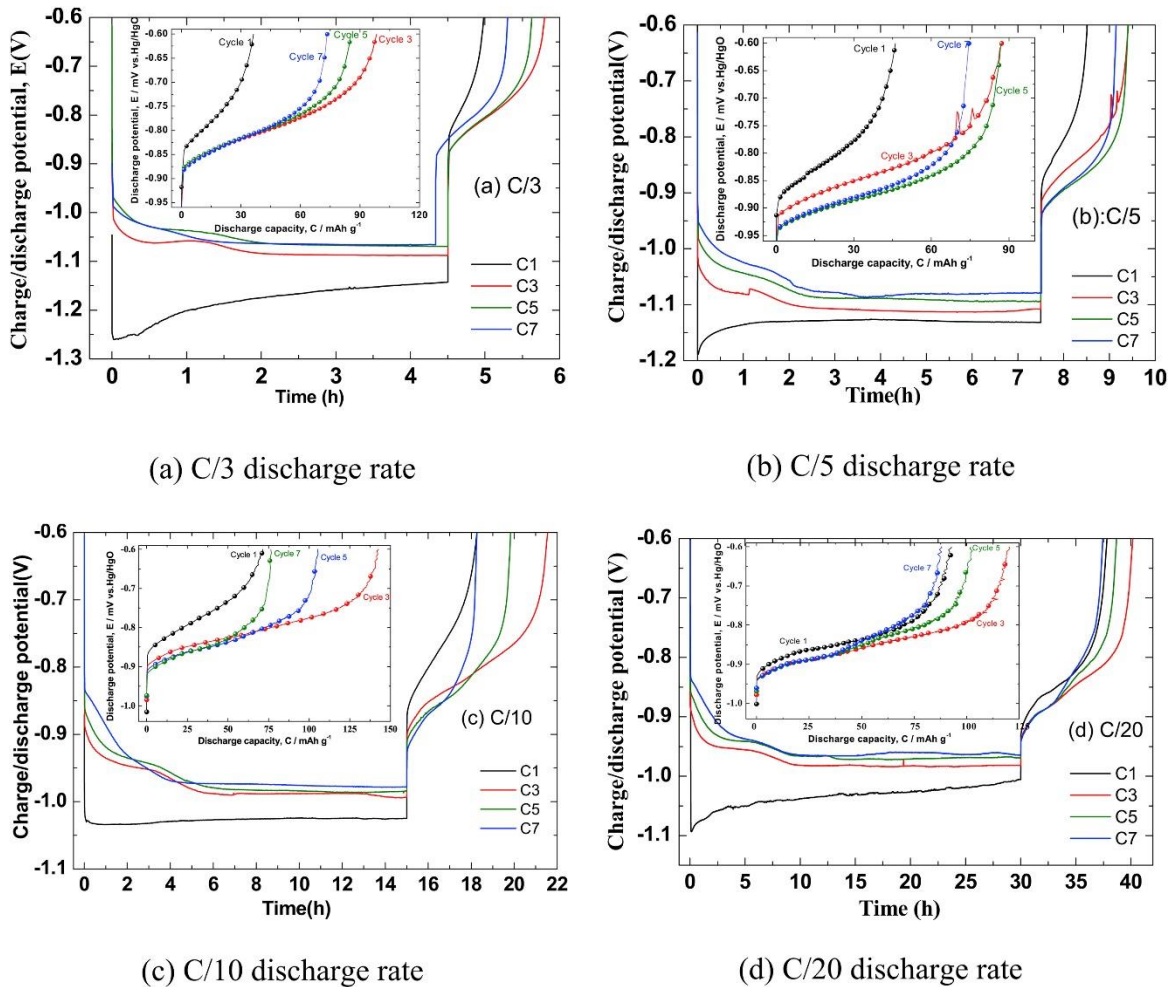
Tyto akumulátory existují ve všech formátech a velikostech od AAA článků až po články na pohánění elektromobilů, například v automobilech s hybridním pohonem značky Toyota a Lexus. Dále se užívají ve velkých úložištích energie.

Akumulátory se vyznačují vysokým počtem cyklů, okolo 2000 a dobrou energetickou hustotou, která se v závislosti od aplikace pohybuje v rozmezí 60-120 Wh/kg.

Výhodou je těchto článků je odolnost vůči poškození, prakticky nejsou omezeny prostorově, lze je tedy aplikovat do libovolných rozměrových formátů a také nízké hodnoty samovybíjení. Nevýhodou je pak i zde přítomná postupná degradace materiálu, konkrétně rozpad záporných elektrod. [20]

Jedna z vlastností Ni-MH je nutnost prvotní aktivace elektrod, k té dojde při prvních cyklech. Počet cyklů potřebných k úplné aktivaci elektrod je závislý na použitém materiálu pro anodu a katodu. Různé typy Ni-MH tedy budou mít rozdílnou dobu aktivace, tato hodnota je navíc ovlivněna rychlostí vybíjení. To je zřejmé na grafu XX

zde je znázorněn počet cyklů nutných pro aktivaci Ni-MH baterie ze slitiny CeY_2Ni_9 která slouží jako anodový materiál. [21]



Obr. 4 Aktivace Ni-MH s CeY_2Ni_9 při různých rychlostech vybíjení [21]

Z uvedených dat v grafech na obrázku 4 je patrné, že výhodou anodového materiálu CeY_2Ni_9 je jeho snadná aktivace, na kterou je třeba třech cyklů bez rozdílu rychlosti vybíjení. Kapacita jako taková je však u rozdílných rychlostí jiná. To lze vidět v tabulce 2, z ní také vyplývá ideální rychlost vybíjení pro aktivaci článku, dosáhne se tak největší kapacity.

Tabulka 2 Hodnoty kapacit při rozdílné rychlosti vybíjení[21]

rychlost vybíjení	C/3	C/5	C/10	C/20
kapacita [mAh/g]	98	87	140	120

2.2.2 Srovnání Nikl akumulátorů

Výhoda těchto baterií spočívá ve vysoké energetické hustotě, ta je větší než u akumulátorů Ni-Cd, konkrétně 60 -80Wh/kg, díky tomu jsou akumulátory o stejné kapacitě

lehčí. U Ni-MH je také výhodou jejich netoxický materiál. Největší výhodou však představuje absence paměťového efektu, kdy nehledě na způsob vybíjení, si akumulátor drží svoje vlastnosti dané z výroby. K nevýhodám Ni-MH akumulátorů patří především horší schopnost uvolnit špičkový výkon a také poměrně velká rychlost samovybíjení. Nejsou tedy vhodné do aplikací, kde je potřeba velký výkon v krátkém čase. Oba akumulátory disponují širokým rozsahem pracovních teplot, jejich nabíjení je možné i pod bodem mrazu. [20; 22; 19; 3]

2.3 Sodíkové akumulátory

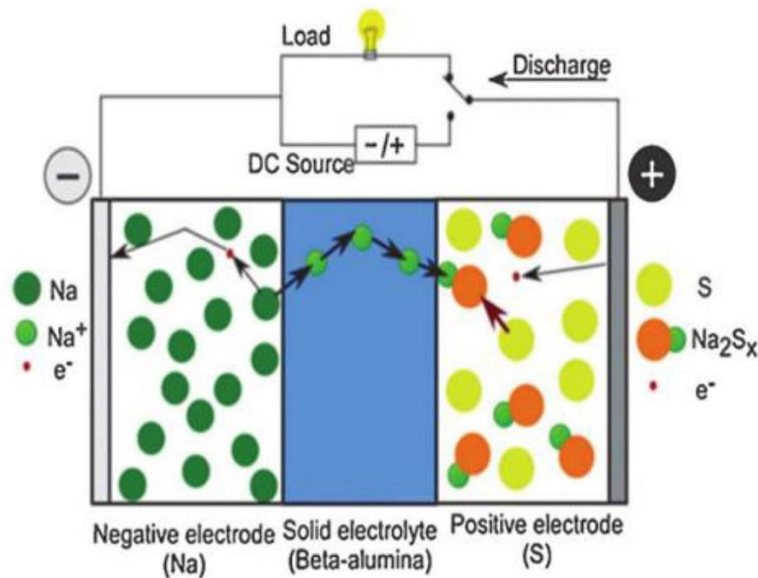
U těchto akumulátorů se očekává vysoká míra využití v BESS, vzhledem k jejich pomalému samovolnému vybíjení a také jejich dlouhé životnosti. Ta u aplikací BESS činí přibližně patnáct let. Počet cyklů, kdy dojde k vybití pod 90 % kapacity baterie, se pak pohybuje mezi 4000 až 5000. Nicméně i zde platí, že při 100 % vybití baterie dochází ke zkracování její životnosti. Dále je nutné udržovat akumulátor při určité teplotě, protože sodík i síra musí zůstat v tekutém stavu. Z toho důvodu se tyto baterie nejčastěji nachází ve velkých izolovaných kontejnerech, kde jsou drženy při provozních teplotách. Nejčastěji se tak setkáme s většími rozměry celého systému z důvodů větší ekonomičnosti. [2]

2.3.1 Sodíko-sírové baterie NaS

V tomto typu akumulátorů se nachází elektrody, kde anoda i katoda jsou vyrobeny ze sodíku a síry a jako separátor mezi nimi slouží vrstva keramického materiálu beta-oxidu hlinitého, ten je v akumulátoru použit jako separátor i jak elektrolyt. Elektrody jsou ve článku uloženy ve formě trubice, to umožňuje akumulátoru změnu stavu během nabíjecích a vybíjecích cyklů. Co se cyklů týče, jejich počet se při 100 % vybití pohybuje okolo 2500, pokud je ale akumulátor udržován na určité hladině, tak se počet cyklů pohybuje okolo 4500 při 80 % DoD (Depth of Discharge). [23]

Po připojení baterie na zátěž začne vně baterie docházet k procesu při kterém, se na rozhraní elektrolytu a elektrod vytváří kladné ionty Na^+ , ty následně migrují skrze elektrolyt, který je tvořen beta-oxid hlinitým a na kladné elektrodě pak dochází k redukci, jejímž výsledkem je vznik sulfidu sodného. [7] Tento proces je pak znázorněn na obrázku 5. Pro optimální funkčnost baterie je nutné držet její teplotu v rozmezí 300 °C až 350 °C, protože je nutné udržovat sodík a síru v kapalném stavu. Dále pak musí být hermeticky uzavřené, a to kvůli reakčnosti použitých látek. Sodík je reaktivní kov, který při styku s vodou reaguje a

začíná hořet. Kromě vzduchotěsného uzávěru je článek chráněn pískem, ten slouží jako fixační médium a také jako retardér hoření v případě poruchy. [7]



Obr. 5 Chemická reakce probíhající v sodíkové baterii při jeho vybíjecím cyklu [8]

I přes některé nevýhody, jako vysoká provozní teplota a nutnost vzduchotěsných nádob, jsou aktuálně NaS (sododík-síra) baterie velmi rozšířené v Japonsku a další projekty vznikají v Americe. Jedno z největších úložišť se nachází v Japonské rozvodně ve městě Buzen, ta má skladovací kapacitu 300 000 kWh a je schopná dosahovat výkonu až 50 000kW. Celý projekt započal v roce 2015 a je v provozu od roku 2016. Baterie jsou zde uloženy ve velkých kontejnerech, se kterými lze v případě potřeby operovat, takže stárnoucí části systému můžou být nahrazeny za nové. Další výhodou těchto kontejnerů je jejich rychlá instalace. [2]

Další velký projekt se nachází ve Spojených Arabských emirátech, a to v Abu Dhabi kde je z NaS akumulátorů vytvořena síť úložišť, která je v dobách přebytku elektrické energie nabíjena a při energetických špičkách je pak tato energie dodávána do distribuční sítě. Systém baterií je tvořen celkem patnácti úložišti, které mají dohromady 108 MW/648MWh. Akumulátory jsou pak napájeny z velké části pomocí solárních elektráren. Tento systém byl prvně spuštěn v roce 2019 a má napomoci tomu, aby do roku 2050 bylo 60 % energie získáno z bez uhlíkových zdrojů. [2; 7; 9]

2.3.2 Sodík-nikl-chlorid baterie NiCl₂

V tomto akumulátoru je katoda tvořena pevnou NiCl₂ a anoda tekutým sodíkem. Katoda je zde impregnována do sodíku vodivé soli NaAlCl₄. Ta potom vytváří vodivou cestu mezi vnitřní stěnou separátoru a kolektoru elektrického náboje. I tento článek je z důvodů použitých poměrně nebezpečných látek nutné hermeticky uzavřít.

Také u těchto článků je třeba dosáhnout určité teploty pro její funkčnost, zde je spodní hranice nižší a to 270 °C až do hodnot 350 °C, liší se od výrobce.

V průběhu nabíjení je NaCl společně s Ni přeměněn na NiCl₂ nikl-chlorid a roztavený sodík Na. Při vybíjení je tento průběh obrácený. [7]

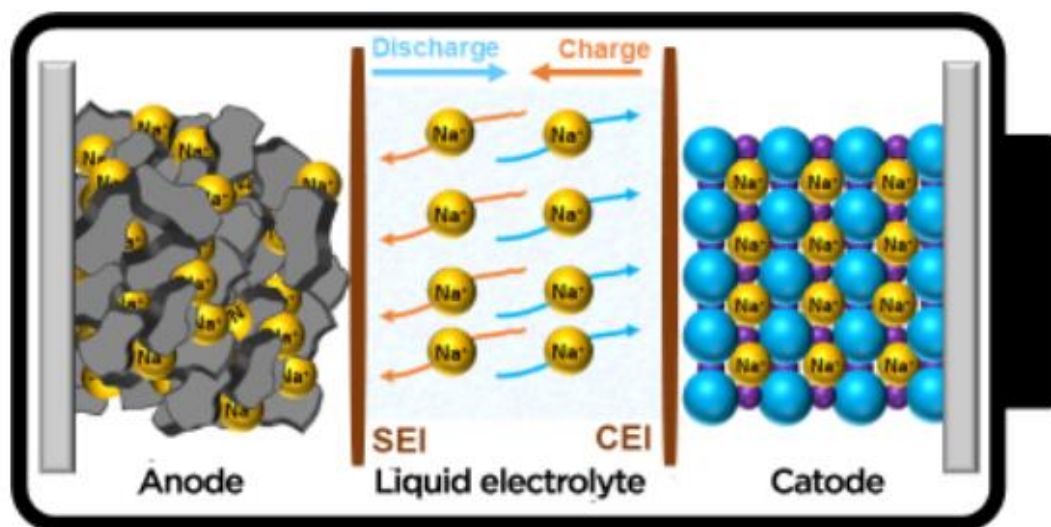
2.4 Sodium-ion akumulátory

Během vývoje lithium-ion baterie, který probíhal v 80. letech, byly zkoumány i další alternativní materiály s perspektivou pro iontové články, jedním z nich byli sodno-iontové baterie neboli Na-ion. Nicméně se, vzhledem k menší energetické hustotě, nakonec svět přiklonil k vývoji k li-ion akumulátorům. Ovšem v posledním desetiletí se naděje vědců opět obrací k této technologii. Hlavním důvodem je posun ve vývoji materiálů, což vedlo ke zvýšení energetické hustoty, ale i nárůstu cen lithia, kobaltu a dalších materiálů potřebných k výrobě li-ion akumulátorů. Právě v tom tkví potenciál této technologie, ve snadné dostupnosti materiálů. [11; 24]

Princip baterie je založen na reverzibilním přesunu iontů mezi dvěma elektrodami, k tomu dochází v prostředí elektrolytu. Kladná elektroda je zde tvořena oxidy sodíku, které dodávají přenosné sodíkové ionty. Zápornou elektrodu tvoří neuspořádané uhlíky. K tomu, aby nedošlo k pevnému propojení elektrod a zároveň byla možná prostupnost iontů sodíku, je zde použito separátoru. Ten dovoluje iontům sodíku přesunutí z jedné elektrody na druhou v závislosti na stavu vybíjení či nabíjení. [25]

Důležitým krokem v životnosti baterie je prvotní nabití, při kterém se vlastnosti elektrolytu mění tak, aby ionty sodíku jimi mohly procházet a docházelo tak k oxidaci a redukci na elektrodách. Při průběhu nabíjení se ionty sodíku uvolňují z kladné elektrody a následně jsou umístěny na záporné elektrodě, kde jsou drženy pomocí absorpce a interkalace. Tento proces bude trvat, dokud nebude inicializován konec nabíjení, nabitý stav je předem nadefinován. V průběhu vybíjení je pohyb iontů sodíku obrácen, tedy ze záporné elektrody na kladnou. V průběhu toho jsou uvolněné elektrony. Ty se pak do katody vrací přes uzavřený obvod.

Na obrázku 6 je znázorněn pohyb iontů sodíku, které se při nabíjení přesouvají na zápornou elektrodu, při vybíjení je tomu naopak.



Obr. 6 Chemický princip článku [10]

V dnešní době neexistuje žádná aplikace velkého rozsahu, jedná se spíše o vývoj, hlavními problémy jsou nízká energetická hustota a nevysoký počet cyklů okolo 1000. [11]

2.5 Srovnání vlastností probraných baterií

V tabulce 3 se nachází přehled vlastností akumulátorů rozebraných v této části práce. Zde je vidět, že nejlepších hodnot gravimetrické energie dosahují akumulátory NaS, které se aktuálně jeví jako vhodná alternativa pro aplikace on-grid úložišť k technologiím jako LIB nebo VFB.

Tabulka 3 Porovnání typů akumulátorů využívající Pb,Ni a Na[26; 18; 19; 22; 2]

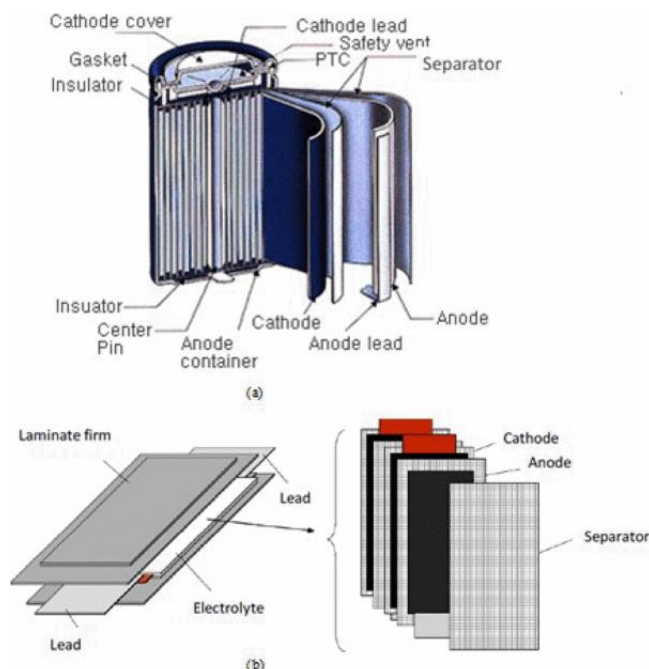
	Pb-acid	Ni-Cd	Ni-MH	NaS
energetická hustota [$W \cdot h \cdot L^{-1}$]	80-90	50-150	140-300	150
gravimetrická energetická hustota [$W \cdot h \cdot kg^{-1}$]	30-40	40-60	60-120	110
počet cyklů při 80% hloubce vybití	2000	2000	500-1000	4500
použité materiály	toxické	toxické	netoxické	toxické
samovolné vybíjení za měsíc	3-20%	10%	30%	neuvádí se
efektivita cyklu	50-90%	70-90%	66%	75-90%
napětí článku [V]	2,105	1,2	1,2	1,82
síla hmotnost (W/kg)	180	150	500-1000	neuvádí se

I přes výhody Pb-acid akumulátorů, ve smyslu zralosti této technologie a nízkých pořizovacích nákladů, nejsou příliš vhodné pro velká úložiště. To převážně vyplývá z problémů z nabíjecích cyklů, kdy s hloubkou vybití rapidně klesá životnost baterií. Pokud jde o kladné vlastnosti, tak k nim patří nízká cena, vysoká elektrická výkonnost, co se ceny týče, pohybuje se v rozmezí 300–600 \$/kWh. Dalším pozitivem je rychlost těchto baterií, jelikož jsou schopné velice rychle reagovat na změny výkonu v řádu jednotek milisekund a jsou velice stabilní. I proto je BESS, které využívají právě Pb-acid akumulátorů, celá řada. [2]

V případě BESS, které využívají Ni baterie je třeba zmínit jejich vysokou životnost až 2000 cyklů, samozřejmě za předpokladu správně regulovaného cyklování a zamezení paměťového efektu. Vlastnosti Ni-cd baterií jsou podobné i pro Ni-MH krom toho, že Ni-MH nedochází k paměťovému efektu, co do nevýhod jsou pak více náchylné na samovybíjení a poškození vlivem přebíjení. Ni-cd baterie jsou pak použité například v systémech BESS nacházejících se na území Aljašky, kde slouží jako záloha s výkonem 40 MW, tento výkon je schopná do sítě dodávat po dobu 15 minut. Tato doba je dostatečná pro zpuštění dalších záložních systémů jako například turbo plynových stanic. [2]

3 Lithiové baterie

V dnešní době jsou největším zastupitelem akumulátorů právě li-ion články. Jejich uložení v baterii se nachází na obrázku 7. Tyto články jsou v dnešní době často užívané a stále se nachází nové možnosti uplatnění této technologie. Uplatňují se jak v malé komerční elektronice (mobilní telefony, laptopy atd.), tak jako napájecí zdroje pro elektrické automobily. K neznámějším patří aplikace od společnosti Tesla, kde jsou použity jak v automobilech, tak potom v ostrovních elektrárnách či velkých úložištích. Konkrétně se používají NCA články, ale v poslední době se začínají postupně více užívat LFP články. Giganty v oblasti lithiových článků jsou např. Panasonic, LG Energic solutin a Contemporary Amperex Technology. Ve velkých úložištích se lze setkat s problémem ve formě vysoké ceny, kdy se na jedné straně nachází akumulátory s aktuálně největší kapacitou a energetickou hustotou a na druhé velmi vysoké náklady pro takto rozsáhlé aplikace. Důvodem je cena lithia, které je poměrně vzácné. U ceny lithia se očekává neustálý růst, ten je vidět i na vývoji ceny, jež se v roce 2018 pohybovala okolo 15000 \$/t, následně dál rostla a v roce 2021 dosáhla historického maxima - 25000 \$/t. Některé prognózy předpokládají, že koncem roku 2022 bude cena kolem 40000 \$/t. [12]



Obr. 7 Uložení li-ion článků v baterii [13]

Lithium je v zemské kůře obsažené v množství 20-60 mg/kg. Dále se na ceně Lithia projevuje jeho energetická náročnost pro získání čistého materiálu, ta se pohybuje od použité

technologie těžby v rozmezí 30-36 MJ na kilogram lithia. Do ceny se promítají i náklady na těžbu a následná rekultivace poškozené krajiny. Může jít o těžbu pomocí vysoušení solných jezer, kdy se do ložisek lithia pumpuje pod tlakem velké množství vody, to se smíchá s horninou, ve které jsou oxidy lithia obsaženy a následně je vše vypumpováno ven ve formě směsi vody a hornin. Součástí těžby je systémem pump rozmístěných do vysoušecích jezer, ze kterých je po vyschnutí extrahována vrstva sedimentů. Z toho vyplývá, že pro těžbu touto technologií jsou zapotřebí rozsáhlé plochy. Dalším typem těžby jsou pozemní doly, kde se extrahuje minerál Spodumen, který se skládá z lithiumaluminiumsolikát $\text{LiAl}(\text{SiO}_3)_2$ a je zdrojem lithia, ten se pak dále zpracovává. [27; 26]

Dnes se nejvíce lithia těží v Čile a Austrálii, ale jsou známá naleziště v amerických státech Kalifornie, Arizona a Nevadě. Známé jsou i naleziště v Čechách, a to v Teplickém okrese v obci Cínovec, zde se nachází jedno z největších doposud známých nalezišť v Evropě. [26]

Lithium je vhodné pro výrobu bateriových článků vzhledem k jeho gravimetrické energii a také jeho objemovou hustotou energie. Obě tyto hodnoty jsou oproti ostatním dostupným prvkům téměř dvakrát větší, a to okolo 160 Wh/kg a 400 Wh/L. [14]

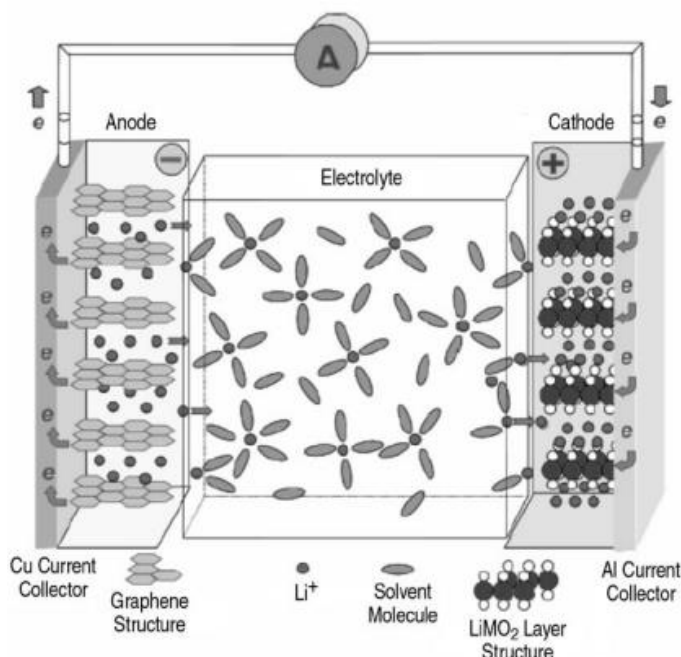
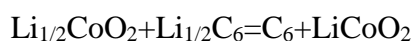
Postupně nastává situace, kdy lithiové baterie vytlačují své předchůdce napříč aplikacemi. Například u elektro automobilů se stávají majoritním typem baterií a postupně mizí původní Ni-MH baterie v těchto aplikacích.

Lithiové baterie se dělí do dvou kategorií primární a sekundární. U primárních baterií jsou elektrody tvořeny kovovým lithiem a elektrolyt se zde nachází ve formě lithiových solí. Primární lithiové baterie jsou používány v malé komerční elektronice, (základní desky počítačů, kalkulaček, hodinek atd.). Z toho vyplývá, že baterie jsou menšího formátu jako AAA a pak knoflíkového formátu CR2032. V tomto případě se skutečně jedná o baterie a nelze je po jejich vybití znovu nabít. Nemají proto pro aplikace v energetice žádný význam. [28]

Sekundární akumulátory jsou tvořeny kladnou elektrodou, zápornou a elektrolytem. Materiály použité na tyto součásti ovlivňují vlastnosti akumulátoru, nicméně základ těchto akumulátorů tvoří katody tvořené oxidem lithným LiMeO_2 a anodou z grafitu, elektrolyt je zde ve formě lithných solí v organických rozpouštědlech. Tyto akumulátory mají široké spektrum využití, a to jak v rámci malé komerční elektroniky telefony, laptopy, tak i jako akumulátory pro ruční nástroje až po elektrické automobily a pak jako velká uložení elektrické energie. V sekundárních akumulátorech se množství použitého lithia pohybuje okolo 0,35g – 26 g na článek.

Dalším typem lithiových akumulátorů jsou lithium polymerové akumulátory. V těch se používá elektrolytu polyakrylonitril nebo polyethylenoxid, ty zde nahrazují lithiové soli. Výhodou je pak jejich menší váha, protože mají větší gravimetrickou energii než ostatní lithiové baterie. Díky tomu jsou schopné dodat stejné množství energie jako jiné lithiové baterie, a přitom je jejich hmotnost nižší. [26]

Principem lithiových akumulátorů jsou články s již zmíněnými elektrodami a elektrolytem. Důležitou vlastností elektrolytu v těchto článcích je jeho schopnost propustit ionty lithia, ale zamezit průchodu uvolněných elektronů, chová se tedy jako izolátor. Pokud je článek v nabitém stavu, tak je záporná elektroda obohacena o částí interkalového lithia, zatímco kladná elektroda je o toto lithium ochuzována. Při procesu vybíjení se atomy lithia uvolňují z anody a přes elektrolyt putují do katody, při tomto procesu je uvolněn elektron, který putuje přes zátěž zpátky do katody. Tento proces je znázorněn na obrázku 8. Zjednodušený chemický vzorec cyklu lithia při nabíjení a vybíjení: [15]



Obr. 8 Chemické reakce v Li-ion článcích [15]

Negativní vlastností těchto akumulátorů je jejich postupná degradace kapacity. S opakujícím se cyklováním nabíjení a vybíjení dochází k tomu, že akumulátor nemá takovou kapacitu, jakou měl při prvních cyklech. Toto není způsobené výrobcem za účelem prodat více

svých výrobků, ale jevy, ke kterým dochází v akumulátoru. Některé z nich jsou dnes známé, ale jiné stále čekají na své objevení. K dalším projevům stárnutí článků patří růst jeho odporu. Ten se projevuje nárůstem zahřívání při nabíjení, což snižuje efektivitu cyklu, kdy je potřeba více energie pro plné nabití, ale ještě se zrychluje postup degradace zvyšováním teploty. Při vyšších teplotách dochází k reakcím v elektrolytu a vznikají fáze, které jsou nepropustné pro ionty lithia. Tyto fáze při dostatečné šířce plochy kompletně oddělí části uhlíku na anodě od zbytku systému. Tím se snižuje množství uhlíku, na které se vážou ionty lithia, a to vede ke snížení celkové kapacity článku. K tomu to jevu stárnutí dále přispívá vznik lithiových dendritů, čímž se snižuje množství volných částic, jež mohou konat práci, ale také se zvyšuje riziko proražení separátoru, který odděluje anodu a katodu. Při proražení pak mohou elektrony volně cestovat z anody do katody, tím dochází ke zkratu a téměř okamžitému uvolnění naakumulované energie. To může vést až k samovznícení či rychlému nárůstu tlaku a explozi. Také mechanické opotřebení má vliv na stav baterie, jelikož při nabíjení a vybíjení dochází střídavě k růstu a smrštění anody a katody. To může vést až k vzniku netěsností mezi elektrodou a elektrolytem, což může způsobit nárůst odporu a zapříčinit tak již zmíněné problémy. [26]

Lithiové baterie jsou stále rostoucím trhem a předpokládá se, že se tento trend v blízkých letech nijak nezmění. K jejich významným výhodám patří schopnost uchovat si velké množství energie a velmi dobrý počet nabíjecích cyklů. Díky tomu jsou velmi vhodným řešením pro on-grid a off-grid úložiště a v rámci jejich životnosti se dá mluvit také o návratnosti investice. [26]

3.1 LCO – lithium cobalt

Jedná se o první komerčně používaný článek s použitím lithia. Byl objeven v roce 1991 a používá se dodnes. Prvním výrobcem těchto baterií byla společnost Sony. Jejich počet cyklů se pohybuje v rozmezí 500-1000, jmenovité napětí článku je 3,9 V a kapacita okolo 155 mAh/g. K jejich nevýhodě patří jednak rostoucí cena kobaltu, tak i nízký počet cyklů v porovnání s ostatními lithiovými bateriemi. Také se jedná o relativně nebezpečné články, při teplotách okolo 150 °C začíná docházet k tepelnému rozkladu článku. Proto při velké zátěži hrozí, že dojde postupně ke zkratu a znehodnocení článku. [26]

Materiál použitý na katodu je v tomto případě LiCoO_2 a anodu tvoří LiC_6 . Přímo aplikované je nalezneme v automobilech značky Tesla konkrétně v modelech Roadster, zde je do tohoto sportovního modelu zvolen díky dobrému elektrickému výkonu. [13]

3.2 LTO – lithium Titan oxide

Akumulátor s dlouhou životností, možností rychlého nabíjení, vysokými vybíjecími proudy. Články LTO mají na anodě použitou kombinaci materiálů lithium-titan oxide, jež se považuje za perspektivní materiál v oblasti baterií. Ten se vyznačuje páteří strukturou, s velkou povrchovou šířkou daleko větší než u ostatních anodových materiálů. Velkou výhodou LTO článků je jejich vysoká účinnost dobíjení, kdy je možné uskladnit až 98 % elektrické energie, takže pouze malé procento jsou ztráty. [29; 30]

Jmenovité napětí baterie je 2,3V a kapacita článku 175mAh/g. Dalšími vlastnostmi LTO článku je jeho bezpečnost, články jsou šetrné k přírodě a nedochází u nich k tepelnému rozkladu, tudíž klesá možnost zkratu článku a jeho poškození s tím spjaté. Počet cyklů se může pohybovat až kolem 20 000 a životnost až 25 let, což jsou teoretické hodnoty, kterým se tyto články až potenciálně mohou dostat. Ani degradace článků vlivem cyklení není vysoká, při ideálním cyklení, kdy jsou dodržovány ideální podmínky pro nabíjení a vybíjení včetně pracovní teploty, jsou zaznamenány případy, kdy při 10 000 cyklu bylo zaznamenána ztráta kapacity 0,001 % na cyklus. [30]

3.3 LMO – Lithium manganese

LMO představují lithiové články, u nichž je kladná elektroda tvořena lithiem-mangan oxid, které jsou také známé pod názvem spinel. Spinel jako takový byl vyvinut laboratoří Bellcore v letech 1995, společnost tehdy přišla s tunelovou strukturou, jež dělá spinel unikátní. Tunelová struktura je zde tvořena λ -MnO₂, lithium pak v katodě vyplňuje osminu jeho celkového množství, dále je zde použito centrované kyslíkové výplně. [13]

Počet cyklů u článků s manganem se pohybuje v rozmezí 300-700 cyklů. Jejich jmenovité napětí na článek činí 3,7V, hodnoty kapacity na článek jsou 100-120 mAh/g. K tepelnému rozkladu začíná docházet při 250 °C, proto jde o bezpečnější články než třeba LMO. Další výhodou je jejich cena, mangan je levnější než například dříve využívaný kobalt. Tyto články proto lze nalézt v aplikacích, kde musí být dodrženy určité náklady, nalezneme je například v elektromobilu Nissan Leaf. K výhodám manganu patří také jeho nízká toxicita, není proto nebezpečný pro životní prostředí. Nevýhodou u akumulátorů je jejich postupná ztráta kapacity v průběhu cyklování. Část manganu, která se přesouvá z anody zpátky na katodu, zůstává uvězněna v elektrolytu. Tím postupem času klesá množství částic, jež se mohou přesouvat a tím i počet elektronů. [16]

3.4 NMC – Lithium nickel manganese cobalt

Články NMC jsou výkonově srovnatelné s články LCO, mají i podobné jmenovité napětí na článek 3,6-3,7V. Počáteční kapacita článku činí 200 mAh/g a počet cyklů se pohybuje okolo 1000–2000. Díky tomu má velmi dobrý poměr kapacity a výkonu, a proto je preferován do aplikací, kde se klade důraz na nízkou hmotnost. Anoda je tvořena kombinací niklu, manganu a kobaltu, což zaručuje kontrolu nad vlastnostmi akumulátoru v průběhu výroby, stačí změnit poměr jedné ze tří složek anody. Tyto články mají dobrou tepelnou stabilitou. Jedním z problémů akumulátoru je, že při zvýšení hodnoty niklu dochází ke zrychlení a zesílení jevu stárnutí baterie, což vede k degradaci a postupnému snižování kapacity. Nicméně množství niklu ovlivňuje velikost kapacity až na 220 mAh/g, s tím také roste hodnota hustoty energie 800 Wh/kg. [31]

Problémy setrvávají, i když se místo niklu použije na katodu větší množství lithiových solí, jelikož opět na akumulátoru dochází ke ztrátám kapacity, pouze se změní principy stárnutí. V tomto případě bude docházet ke vzniku dendritů, k silnému pokovování anody atd.

K dalším nevýhodám patří vysoká cena. Jedná se o poměrně novou technologii a také značně náročnou, jelikož jsou potřeba k vytvoření katody tři kovy, a proto je proces výroby náročný jak technologicky, tak finančně. Naproti tomu vstupní cena materiálů je nižší. Proto lze předpokládat, že po optimalizaci a zefektivnění výroby půjde o levné články s dobrými vlastnostmi. [32]

3.5 LFP – Lithium iron phosphate

LFP neboli lithium železo-fosfát jsou články vyrobené s použitím fosforečnanů železa v katodě. Ten se v katodě chová extrémně stabilně, výrazně pak snižuje možnost vzplanutí, nedochází u něj při vyšších teplotách ke změnám. Jeho stálost se projevuje i při zkratu a případném přebití. Při zvýšení teploty, ať už vlivem zkratu nebo přebití, nedochází u LFP článků k tepelnému rozkladu. Jedná se tedy o velmi bezpečné články z hlediska provozu a skladování. Dále jsou články odolné vůči oxidaci a kyselosti prostředí, to je způsobené krystalickou strukturou stejnou jako u olivínu. [33] Méně se deformuje a její materiálová stabilita převyšuje jiné typy Li-ion baterií. Díky tomu také LFP akumulátory dosahují velkého počtu cyklů, a to v rozmezí 2000-5000, proto jsou zapotřebí systémy kontrolovaného cyklování, aby došlo k maximálnímu prodloužení životnosti. [34]

Jmenovité napětí článku činí 3,6V, měrná hustota energie se pohybuje okolo 100–160 Wh/kg a kapacita je 160 mAh/g. Pracovní teploty pro tento typ baterií se pohybují v rozmezí od -30 °C do 60°C. [34]

Další výhodou je netoxicitata LFP článků a také dostupnost surovin, které se v přírodě vyskytují v hojném množství. Aktuálně jde o jednoho z největších kandidátů pro on-grid úložiště a elektro mobilitu.

3.6 NCA – Lithium nikl kobalt aluminium

Vývoj těchto akumulátorů probíhal společně s NMC, jedná se tedy o jednu z kombinací nikl-kobalt, která byla zkoumána pro svůj potenciál stát se náhradou za LCO články. Výhodou obou technologií jak NMC, tak NCA v porovnání s LCO je cena, ta se pojí s množstvím kobaltu, použitým v člancích. [35; 36]

NCA články se vykazují středním počtem cyklů pohybujících se mezi 500–1000, dále mají energetickou hustotu 260 Wh/kg. K jejich tepelnému rozkladu začíná docházet od 150°C, články jsou tudíž méně bezpečné než srovnatelné články NMC. Z důvodů bezpečnosti je třeba udržovat zpětnou vazbu se článkem, je třeba sledovat hodnoty napětí a teploty. Dalšími hodnotami článku jsou jmenovité napětí v rozsahu 3,2–4,2V a kapacitě 136 mAh/g. [36]

3.7 Li-S – lithium síra

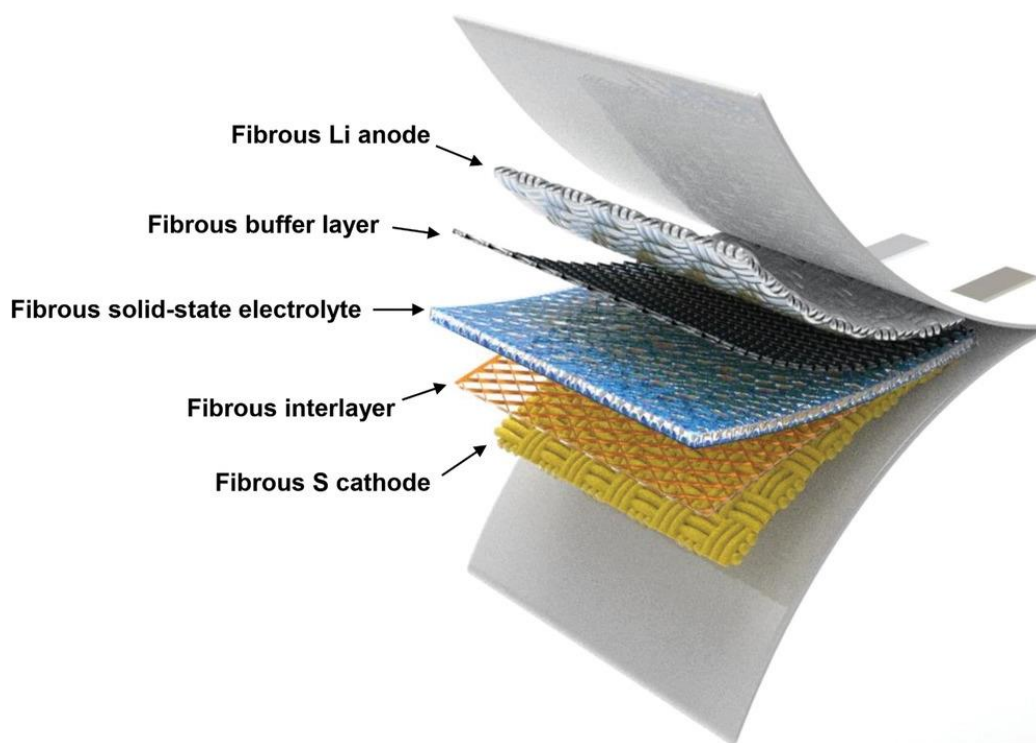
Jedná se o články, které se z hlediska vývoje stále nacházejí na relativním začátku, ač jsou články jako takové známé již delší dobu, stále nebyli vyřešeny některé jeho problémy a z toho důvodu se ještě nepřešlo na užití těchto článků do praxe. Hlavním důvodem, proč se do této technologie vyplatí investovat je fakt, že li-S akumulátory se vyznačují velmi dobrou gravimetrickou energií okolo 550 Wh/kg což je znatelně více než u ostatních li-ion článků. Jejich energetická hustota se také pohybuje ve velmi výjimečných hodnotách okolo 450Wh/l, jmenovitá hodnota napětí je 2,15V a maximální 3,8V. Dále je třeba zmínit snadnou dostupnost síry, která vzniká jako vedlejší produkt při odsiřování ropy, tak je možné jí těžit v přírodě u sirných gejzírů. Jedná se tedy o levný a dostupný materiál. Co tedy drží-li-S články od komerčního použití a úspěchu je jeho velmi rychlá ztráta kapacity článku již při prvních jeho cyklech. To je způsobeno špatným cyklením síry z katody, která je S₈ tvořena, na anodu a zpátky. Dochází k velkým materiálovým ztrátám, a tak velmi brzo klesá počet aktivních nosičů. [37]

To je tvořeno tak zvaným shuttle efektem, kdy dojde k rychlému spotřebování materiálu. Tento jev se dá pospat jako postupné rozpouštění polysulfidů lithia a tvorbě lithiových dendritů. Ten má za následek degradaci článku, ale také postupnému klesání bezpečnosti tohoto článku. [37; 38]

3.8 Li-S s nano vlákny

Jedná se o stejnou či velmi podobnou kombinaci elektrod tvořící tento článek, ten se může mírně lišit na základě různých příměsí. Hlavní změnou zde je ve struktuře materiálu, jak jsou elektrody zde tvořeny.

Technologie článků Li-s je založená na vláknité materiální struktuře, díky tomu mají články určitou flexibilitu, lze je částečně roztahovat a odolávají deformacím. Tyto vlákna jsou tvořena z kovů, uhlíků, kompozitu a polymeru. Jednotlivé vrstvy a jejich materiál jsou zobrazeny na obrázku 9. [39]



Obr. 9 Vrstvy materiálu v Li-s článku s nano vlákny [39]

Výhody této technologie tkví jednak v mechanických vlastnostech, kdy je možné užití ve formě chytré tkaniny, ale také v tom, že elektrody ve formě vláken mohou dosahovat vyšších kapacit než jejich tenkovrstvé elektrody. „To je způsobené mezifázovým kontaktem mezi vláknitými kolektory proudu a příslušnými aktivními materiály“ [39] Kvůli použití vláknitých elektrod dochází ke zmírnění degenerativních jevů článků, lze tedy

předpokládat, že v budoucnu budou mít delší životní cyklus než klasické Li-ion články.

Jmenovité napětí je 2,7V při nabitém stavu, jeho teoretická hodnota energetické hustoty je 2567 Wh/kg, kapacita pak kolem hodnot 712mAh/g. Ovšem je nutné zmínit, že se jedná o teoretické hodnoty a že tato technologie je stále na začátku vývoje. [39]

3.9 LiC Lithium-iontový kondenzátor

Jedná se o poměrně novou technologii, která kombinuje vlastnosti super kondenzátoru a lithium-ion baterií. Zde se článek skládá z katody, jež je tvořena aktivním uhlíkem, stejně jako u super kondenzátorů, a anoda je pak tvořena aktivním uhlíkem, který je dotovaný částicemi lithia. Jedná se tedy o kombinaci dvouvrstvého kondenzátoru a lithium-ion baterie. Kondenzátor je z důvodů zlepšení přechodu mezi elektrodami a elektrolytem. [40]

Díky použití lithia se u LiC dosahuje daleko větších hodnot výkonu než u super kondenzátorů. LiC je tedy s výkonem okolo 10kWh/kg velmi dobrým adeptem pro další generace velkých bateriových úložišť, případně jako zdroj energie pro elektromobily či jiné aplikace. Jmenovité hodnoty napětí je 3,2 a gravimetrická hustota je 14kWh/kg. [41]

Hlavní nevýhodou této technologie je komplexnost mechanismů stojících za ukládáním elektrické energie. Pro vědce a vývojáře není snadné odlišit elektro statické nabíjení, oproti lithiové difúzi. Kvůli tomu je těžké navrhnout článek s přesnou kapacitou na základě předchozích návrhů. [42]

Jak už bylo zmíněno, překážkou v implementaci této technologie do systémů pro uložení elektrické energie je fakt, že stále tato technologie není ve stavu vývoje, kdy by to bylo možné.

3.10 Srovnání Lithiových baterií

V tabulce 4 se nachází souhrn parametrů výše zmíněných technologií, které jsou v této práci přibližné. Z tabulky i textu je patrné, že i přesto, že se stále jedná o li-ion akumulátory, tak velmi záleží, jaké materiály jsou v článku akumulátoru použity. Od toho se také odrážejí možnosti aktuálních aplikací, kde mohou být články využity.

Tabulka 4 Srovnání Lithiových baterií [26; 29; 30; 43; 44; 37; 36; 45; 46; 41]

	LCO	LTO	LMO	NMC	LFP	NCA	Li-S
Jmenovité napětí [V]	3,9	2,3	3,7	3,7	3,6	3,2	2,15
maximální hodnota napětí [V]	4,20	2,7	4,20	4,20	4	4,2	3,8
počet cyklů	500-1000	20000	300-700	1000-2000	2000-5000	500-1000	300
gravimetrická energie [Wh/kg]	155	96	100-120	800	100-160	260	550
Tepelný rozklad článku [°C]	150	neděje se	250	210	neděje se	150	200
Bezpečnost	nízká	vysoká	dobrá	dobrá	vysoká	dobrá	vysoká
kapacita článku [mAh/g]	155	175	100-120	220	160	136	350

Na první pohled je zřejmé, že pokud budeme lithiové články porovnávat s ostatními bateriemi, které jsou založeny na jiných materiálech než na lithiu (například na Pb-acid baterie), že mají lithiové baterie vyšší hodnoty gravimetrické energie. Nejen z toho, ale i z praxe pak vychází, že lithiové baterie jsou daleko lehčí při stejné kapacitě jako Pb-acid.

Z toho důvodu se také aktuálně používají v majoritě elektromobilů, kterých stále přibývá a jejich počet bude stále jen růst. Lithiové baterie mají kromě tohoto uplatnění své místo i v jiných aplikacích, krom komerční malé elektroniky také v on-grid a off-grid úložištích elektrické energie, konkrétně například systém instalovaný v Laurel Mountain, který je společně s větrnou elektrárnou schopen dodat 32MW/8MWh, slouží k pokrytí špiček a výpadků pro část města New York. Celý systém byl instalován již v roce 2011. [47]

Obecně se nechává očekávat větší rozmach lithiových baterií a jejich implementace do systémů grid-on, ostatně v systémech malých domácích fotovoltaických elektráren již tvoří majoritu. Je to způsobené převážně velkým množstvím nabíjecích cyklů, i přesto že počet celkových cyklů nezaručuje nekonečnou životnost, tak se aktuálně jedná o jedno z nejlepších řešení pro tyto aplikace.

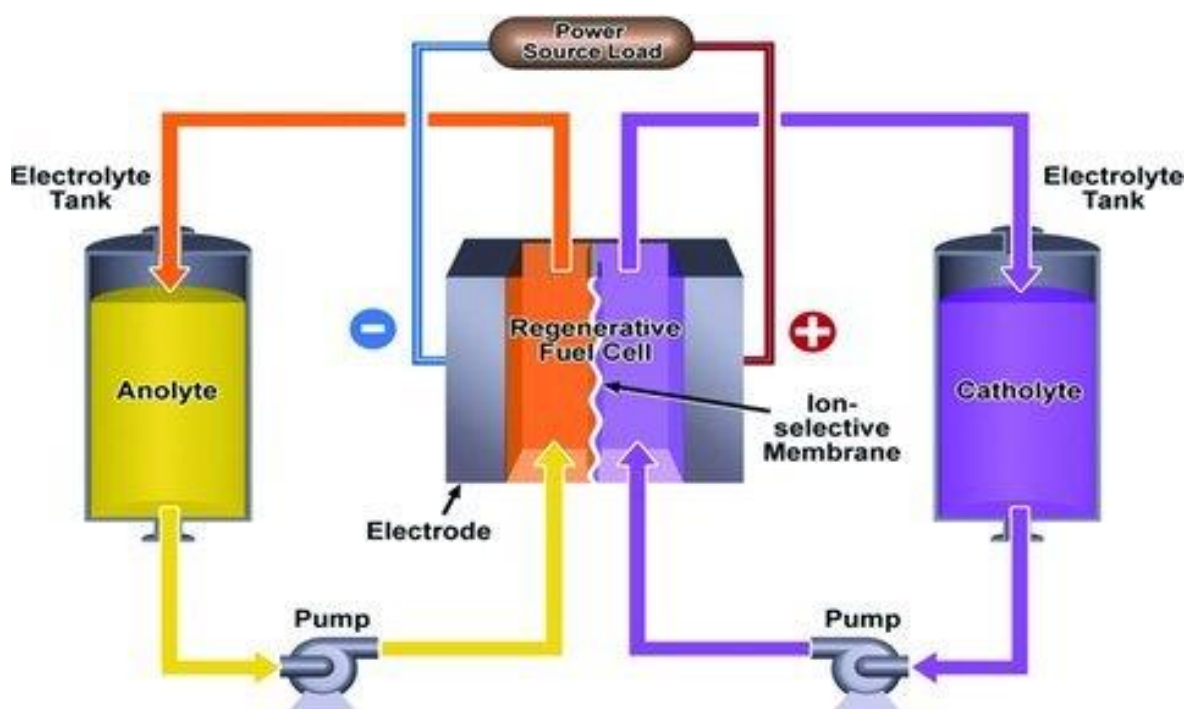
Nevýhodou pak jsou vysoké vstupní náklady, kdy se v závislosti na technologii můžeme pohybovat od 100\$/kWh až do jednotek tisíců \$/kWh v závislosti na použitých materiálech. S tím, jak bude stále větší potřeba po lithiových článkách pro potřeby elektromobility, tak bude mít stále větší podíl na trhu díky zákazu EU od roku 2035 přestat prodávat nové automobily se spalovacím motorem, tudíž s rozmachem těchto technologií dojde i zvětšení objemu výroby a tím snížením ceny, alespoň takové jsou aktuální prognózy. Nicméně i tak budou lithiové články poměrně drahé s tím, jak bude docházet k nárůstu materiálů, jako jsou již zmíněné lithium, kobalt a další materiály důležité pro výrobu LIB. [48]

Také je nutné zmínit, že s rostoucím množstvím vytvořených LIB systémů je třeba vytvořit efektivní systémy pro recyklaci kovů obsažených v LIB. Jednak se tím sníží množství vytvořeného odpadu, ale efektivně se tak bojuje proti vyčerpávání těchto nerostných surovin.

I tak se stále objevují nové a nové technologie, které se jeví jako perspektivní pro budoucí použití v široké spektrum aplikací, za zmínku stojí jak již v této práci zmíněné Li-S s použitím nanotechnologií díky těm tak bude možné upravit existující technologie a zlepšit jejich vlastnosti.

4 Redux Flow Batteries

Redoxní průtokové baterie neboli RFB (Redux Flow Batteries) jsou baterie tvořené, stejně jako u ostatních baterií, dvojicí rozdílných materiálů s různou polaritou iontů a separátoru. V případě RFB se jedná o elektrody tvořené kapalinou místo pevných látek. Tato kapalina, přesněji elektrolyt, je uchovávána v oddělených nádržích, aby docházelo k přeměně chemické energie na elektrickou je třeba obsahy těchto nádrží přečerpávat minimálně přes jednu další nádrž, ve které pak dochází k interakci těchto elektrolytů. Zde jsou odděleny membránou nebo separátorem, který umožňuje pohyb částic, ale zamezí zkratu. Nicméně u RFB baterií při smíchání obou elektrolytů nedojde ke zkratu a jeho tepelným účinkům, je proto zdaleka víc bezpečný než jiné formy uložení elektrochemické energie. Průtokové baterie jsou také nazývány palivovými články, pro jejich funkci je elektrolyt v nich přečerpáván z externích úložných nádrží do nádrže, kde dochází k interakci. Elektrolyt je zde tedy jako palivo, to je reverzibilně konvertováno z chemické energie na elektrickou. Schéma RFB je znázorněn na obrázku 10.



Obr. 10 Schéma RFB [49]

Výhod RFB je hned několik, a některé jeho nevýhody lze kompenzovat jinými vlastnostmi systému. Například oproti ostatním bateriím menší energetickou hustotu, to lze kompenzovat množstvím elektrolytu. Ten není cenově tak nákladný a jsme tak omezeni spíše prostorem jaký můžeme zabírat pro nádrže. Těch může být libovolné množství a velikosti.

Výhodou jsou i vlastnosti látek použitých jako elektrolyt, ty jsou netoxické a ve velké míře i snadno dostupné, tím mají značnou výhodou oproti jiným akumulátorům. Akumulátory mají velký rozsah pracovních teplot a to od $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, za normálních podmínek tak není třeba chladících okruhů, nicméně je nutné mít tyto hodnoty na paměti, nebudou tak vhodné do extrémních podmínek určitých lokalit. Mají velmi vysoký počet cyklů konkrétně při použití vanadu jako elektrolytu, se počet cyklů pohybuje v rozmezí 15000–20000, zde je třeba zmínit, že elektrolyt může být i následně vyčerpán a nahrazen novým roztokem, tím se opět prodlužuje životnost, a i návratnost investice do tohoto systému. Hlavním důvodem, proč tato technologie není příliš rozšířená, jsou vysoké náklady na ovládací elektroniku, ta musí být dostatečně citlivá, aby byla schopna reagovat na změny odběru a regulovala rychlosti přečerpávacích pump, dále pak nízká výkonnost těchto palivových článků. Jako výhody obecně u palivových článků je třeba uvést jejich snadnou škálovatelnost, téměř nulové vybíjení, díky kterému jsme schopni ukládat energii na dlouhé měsíce s minimálními ztrátami. Velmi rychlá odezva na změny požadovaného výkonu. [49]

Pro palivové články bylo a je testováno mnoho kombinací chemikálií, zde jsou rozebrány pouze ty, které se z nějakého důvodu jeví či jeví jako perspektivní pro aplikace grid-on.

Poměrnou novinkou mezi průtokovými články jsou organické články, které by do budoucna z ekonomického pohledu dávali smysl pro komerční využití. Hlavní výhodou organických článků je pak laditelnost redox aktivních složek. Organické články pak nevyužívají kovů jako elektrolytu, ale je zde použito například NaClO_4 . [49]

Další novinkou, která se na poli průtokových baterií objevila, jsou hybridní RFB akumulátory. Ta se liší hlavně použitými materiály pro elektro aktivní elektrolyty, zde se používá polotuhého lithia, které ve formě suspenze cirkuluje v bateriích. Lithia je zde použito kvůli snaze dosažení velké hustoty energie lithia, a přitom zachovat vlastnosti průtokových baterií jako oddělení výkonu a energie. [50; 51]

4.1 VRBF

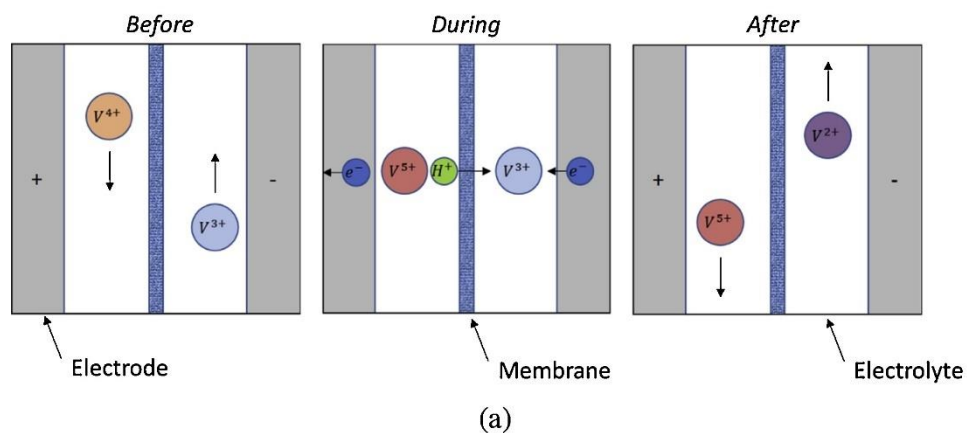
V těchto člancích je použito vanadu v obou nádržích, nemůže pak při jejich provozu docházet ke smíchání složek, i v případě že se částice obsahu jedné nádrže dostanou do druhé skrze separátor, nedojde pak ke kontaminaci a tím ke snížení účinnosti. Díky tomu také tyto články dosahují životnosti 15000-20000 cyklů. Velkou nevýhodou je pak nízká hustota energie, ta se pohybuje okolo $25\text{--}50\text{ Wh/l}$, hustota výkonu pak je zhruba 800 W/m^2 a jmenovité napětí článku je $1,26\text{V}$. Další nevýhodou je pak oxidace podpůrného elektrolytu

na vzduchu, článek je proto nutné navrhnout tak, aby nedocházelo k jeho kontaktu s podpůrným elektrolytem. [53]

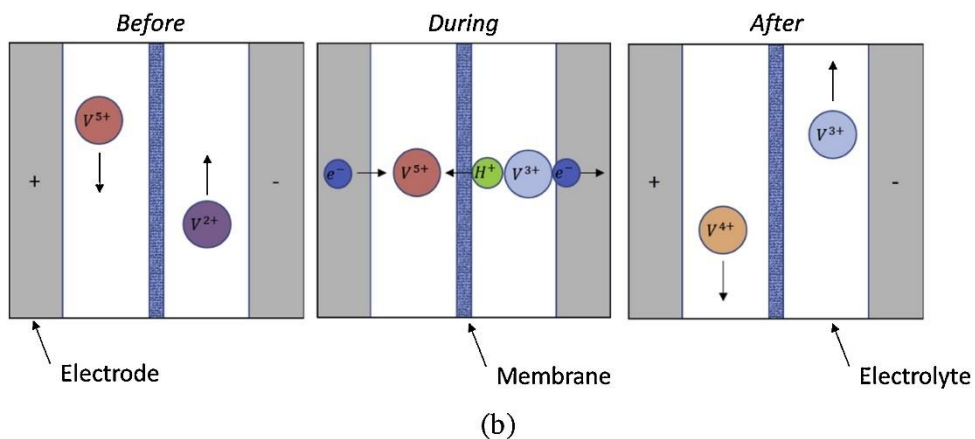
Principem nabíjecího a vybíjecího cyklu je interakce dvou elektrolytů, ty se skládají z redoxně aktivních látek, je zde použito ještě podpůrného elektrolytu, většinou se jedná o různé kombinace Cl (HCl, SbCl). Přechod iontů vanadu skrze separátor je pak vidět na obrázku 11. [52]

S touto technologií se můžeme setkat například v Abira-Chou ležícím na ostrově Hokkaido, kde je tato baterie instalována a je schopná dodat do sítě až 15 MW, tento výkon je schopný pokrýt spotřebu města Abira-Chou po dobu 4 h. [19]

Charging Process



Discharging Process



Obr. 11 Pohyb iontů ve VRBF skrze separátor [52]

4.2 ZBFB

V tomto článku se již jedná o kombinaci dvou různých materiálů zinku a bromidu, které spolu reagují. V tomto případě se v nádržích používá elektrolytického roztoku ze směsi bromidu zinečnatého s vodou, ten je zde ve funkci pomocného elektrolytu a pak sekvenčního elektrolytu a to bromu. Dále jsou zde použity elektrody, jejichž materiál také ovlivňuje vlastnosti akumulátoru, například kovové elektrody zde trpí na koroze je, proto použito uhlíkových. Zde, stejně jako například v li-ion bateriích, dochází ke vzniku dendritů, ty pak způsobují degradaci jeho schopnosti přenášet náboj. Tento jev lze značně ovlivnit vlastnostmi separátoru. Ten je zde ve formě membrány, která odděluje oba aktivní elektrolyty tedy zinek a bromid, zabrání se tak křížení jejich iontů. [54]

Při nabíjení dochází k redukci zinkových iontů na zinek a ten se dále usazuje na zinkové elektrodě a mezitím bromidové ionty oxidují na brom a usazují se na bromové elektrodě, ty pak tvoří polybromidový komplex na straně bromu. Při vybíjení pak zinek oxiduje na ionty zinku a brom se redukuje na bromid. [54]

Hustota energie těchto článků se pohybuje okolo 70 Wh/L, energetická účinnost pak kolem 65 % - 90 %, jmenovité napětí článku 1,85V. Výhodou je pak nižší cena celkového materiálu akumulátoru na kWh. [55]

4.3 Polysulfid brom

Bromid polysulfidové baterie je dalším příkladem z RFB, tato technologie stále není používána ve velkém, jedná se spíše o jednu z mnoha potenciálních materiálových kombinací, které se jeví jako perspektivní pro využití v RFB. I zde jsou stále určité nedostatky, jedním z nich je nízká účinnost, ta se pohybuje v rozmezí 60 %-75 %. Dále pak vysoká cena uhlíkových elektrod, procesní náročnost na výrobu polysulfidu a také kontaminace v průběhu nabíjecích a vybíjecích cyklů. [54]

I přesto se již objevují první projekty BESS, které využívají těchto materiálů k uložení energie. Například společnost Technologie Regenesys udává, že se jim podařilo vytvořit úložiště pro dva výrobní závody a to pro 120 MWh a 15 MW. [54]

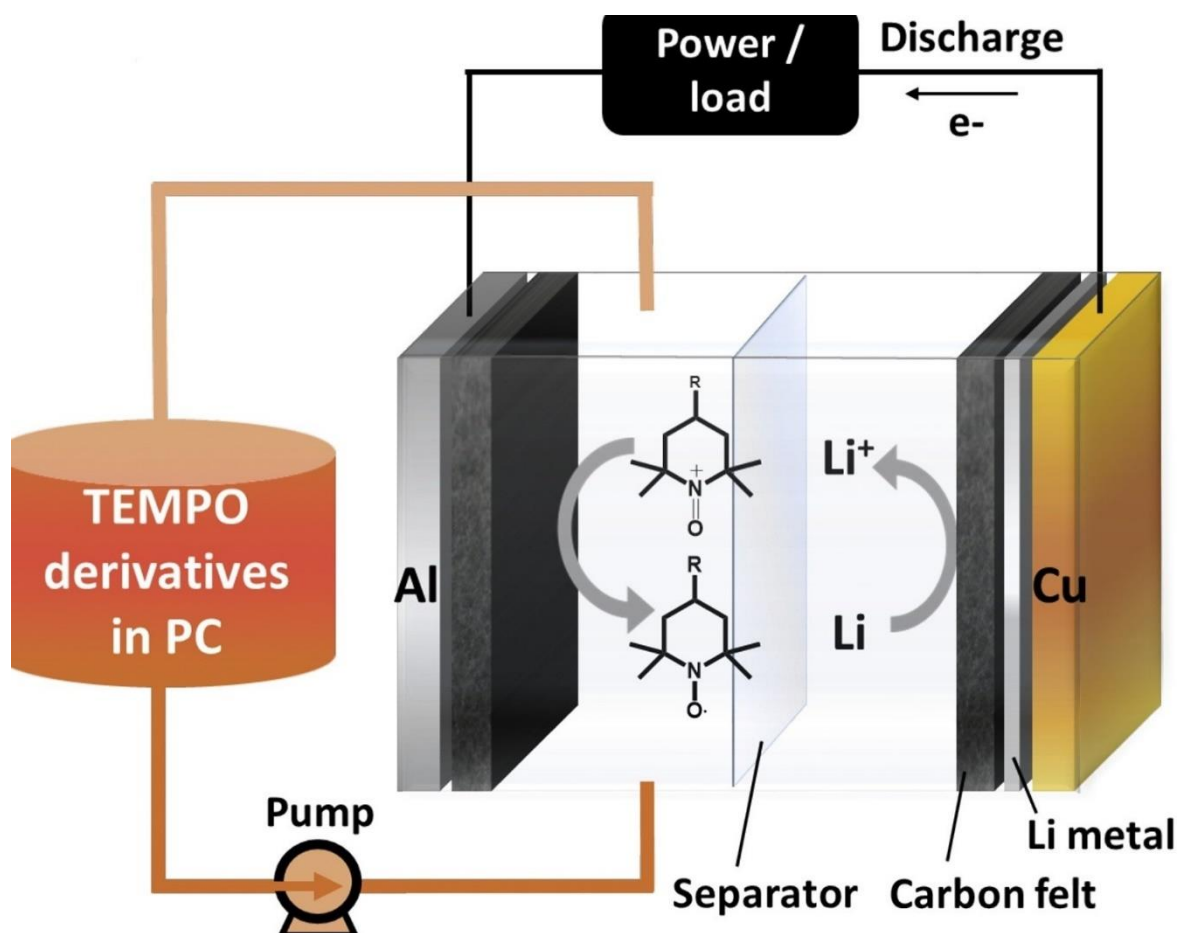
Baterie využívající polysulfid brom mají jmenovité napětí 1,36V, jejich gravimetrická energie je zhruba 30Wh/L. Co se parametrů týče, největší nevýhodou je jejich nízká efektivita, která se pohybuje v rozmezí 60 %-75 %, to je zapříčeno nutností lepší optimalizace chodu pump a také nutností jejich napájení. Dalším problémem, kterému

polysulfid brom mají je pak cena materiálů jako je uhlíková plst', a také náročnost přípravy roztoku polysulfid bromu. [19]

Dalším problémem je i nízký počet cyklů, jež se podepisuje na aktuálně slabé komercializaci této technologie. Nicméně jsou vyvíjeny snahy tyto nedostatky odstranit například použitím membrán, které jsou schopné lépe pracovat v této technologii. [56]

4.4 Li-RFB

Lithium-iontová redoxní průtoková baterie neboli li-RFB. Jedná se o kombinaci lithium-ion baterie a redoxní průtokového systému. Díky této kombinaci má systém daleko větší hustota energie, kromě toho mají-li-RFB také vysoké provozní napětí. Z toho důvodu je tato technologie dále zkoumána a hledá se možnosti její případné implementace do BESS. [57] Principem technologie je zmíněné propojení technologií RFB a li-ion baterií, jak jsou tyto technologie propojeny je vidět na obrázku 12. V tomto případě je do systému ještě zakomponován TEMPO což je označovaná řada katolytů 2,2,6,6-tetramethylpiperidin-1-oxylu a jejich derivátů. TEMPO se v tomto systému jeví jako velice efektivní a doposud testované baterie s těmito měly daleko lepší výsledky co se cyklení baterie týče a také efektivity celého systému. Výběr materiálů má tedy přímý vliv na vlastnosti systému. [57] S použitím TEMP se u li-RFB dosahuje hodnot napětí mezi 2,7-4,2V, gravimetrická energie pak je 120 Wh/kg a kapacita dosahuje až 130 mAh/g.



Obr. 12 Schéma systému Li-RFB [57]

Nevýhodou je pak komplexnost systému, zde je třeba zvolit správných materiálů pro separátor, ten musí oddělovat pevný elektrolyt od vodné katody a organického elektrolytu. [58] Dále pak fakt, že aktuálně nejsou zcela prozkoumané jevy, ke kterým dochází v těchto systémech. Stále není jasné, proč dochází k degradaci aktivních látek a proč dochází k degradaci buněčného materiálu membrány. Důležité bude také důkladné prozkoumání, jakého materiálu použít, zde zmíněný TEMPO je pouze jeden z mnoha materiálů, který je v současné době testován a další vhodné materiály jsou stále objevovány. [57]

4.5 Srovnání Redux Flow baterií

Velmi obecné srovnání vlastností průtokových baterií se nachází v tabulce 5. Lze říci, že se jedná o technologii, která se bude čím dál více objevovat v aplikacích pro on-grid případně jako off-grid úložiště. Důvodů je mnoho, například výhoda spočívá ve snadné modularitě systémů, kdy si lze vytvořit velikosti nádrží na míru. Dále při porovnání s ostatními

technologiami, se zde jedná o životnost v řádu desítek let, čehož se u ostatních typů baterií nedosahuje.

Tabulka 5 Srovnání průtokových baterií [53; 55; 56; 59]

	VRFB	ZBFB	Polysulfid RFB	Li-RFB
jmenovité napětí [V]	1,26	1,85	1,36	2,7
energetická hustota [Wh/l]	25-50	15-25	30	120
počet cyklů	15000-20000	15000	1200	300
cena [\$/kWh]	200-750	300–1000	300–1000	Není stanovena

Další výhodou těchto systémů je snadná recyklovatelnost, v porovnání s dnes tolika rozšířenými li-ion bateriemi, kdy celé systémy po výměně membrán, elektrod a elektrolytů může fungovat dále.

Nevýhodou těchto technologií je pak nízká energetická hustota, je tedy zapotřebí velké množství elektrolytu na dosažení rozumných výkonů, dále pak složitost regulace dodávaného výkonu do sítě, ta vyžaduje sladěný chod přečerpávacích pump s nároky na výkon.

Nejvíce jsou aktuálně rozšířené technologie VRFB ta je například v Německu, kde byl otestován systém s výkonem 0.3MW/1.3MWh, v Itálii 0,45MW/1,44MWh. Lze očekávat, že se stále rostoucím vlivem obnovitelných zdrojů energie, jako jsou solární elektrárny a větrné, bude stále větší nárůst právě RFB systémů, po optimalizaci materiálů pak budou vzhledem k životnosti ideálními řešeními. [60]

5 Určení technologické připravenosti systémů

Níže se nachází tabulka, ve které je stanovená stupnice připravenosti technologie, ty se v různých zdrojích liší na základě počtu úrovní a jejich definic. Zde je škála od 1-9 kde nejvyšší hodnota značí komerční připravenost systému.

Tabulka 6 Stupnice připravenosti technologie [61]

číslo úrovně	definice
1	základní principy formulované a/nebo reportované
2	koncept technologie formulován
3	Analytická a experimentální kritická funkce a/nebo charakteristický důkaz koncepce
4	hodnocení technologie v laboratorních podmínkách
5	laboratorní hodnocení obdobného systému
6	validace obdobného (prototypického) systému v relevantním prostředí
7	podobný (prototypický) systém demonstrován v relevantním prostředí
8	Skutečný systém dokončen a kvalifikován prostřednictvím testu a demonstrace.
9	zhotovený systém fungoval v celém rozsahu očekávaných podmínek

V následující tabulce jsou definované technologická připravenost jednotlivých článků zpracovaných v této práci, určení TRL je na základě získaných informací o BESS a subjektivním názoru autora.

5 Určení technologické připravenosti systémů

Tabulka 7 Určení technologické připravenosti bateriových systému a jejich náklady [61]

	TRL	stav technologie	cena \$/kWh
Pb-acid	9	velmi užívaná technologie s komerčním využitím	100-300
AGM	9	velmi užívaná technologie s komerčním využitím	150-300
GEL	9	velmi užívaná technologie s komerčním využitím	150-300
Lead-carbon	6	prototypy bez komerčního využití	není stanovena
Ni-Cd	9	velmi užívaná technologie s komerčním využitím	400-1000
Ni-MH	8	méně užívaná technologie s komerčním využitím	520-1000
NaS	8	méně užívaná technologie s komerčním využitím	400-1000
NiC12	7	méně užívaná technologie s komerčním využitím	450-1000
Na-ion	5	prototypy bez komerčního využití	není stanovena
Li-ion	8	velmi užívaná technologie s komerčním využitím	300-700
LCO	8	velmi užívaná technologie s komerčním využitím	350-800
LTO	6	prototypy bez komerčního využití	není stanovena
LMO	7	méně použitá technologie s komerčním využitím	300-650
NMC	6	prototypy bez komerčního využití	není stanovena
LFP	8	velmi užívaná technologie s komerčním využitím	300-650
NCA	6	téměř nepoužívaná technologie	400-600
Li-S	7	prototypy bez komerčního využití	není stanovena
Li-S s nanovláknny	4	prototypy bez komerčního využití	není stanovena
LiC	4	prototypy bez komerčního využití	není stanovena
VRBF	8	méně užívaná technologie s komerčním využitím	300 - 1000
ZBFB	8	méně užívaná technologie s komerčním využitím	300 - 1000

5 Určení technologické připravenosti systémů

Polysulfid brom	5	méně užívaná technologie s komerčním využitím	300 - 1000
Li-RFB	4	prototypy bez komerčního využití	není stanovena

6 Porovnání dynamických vlastností

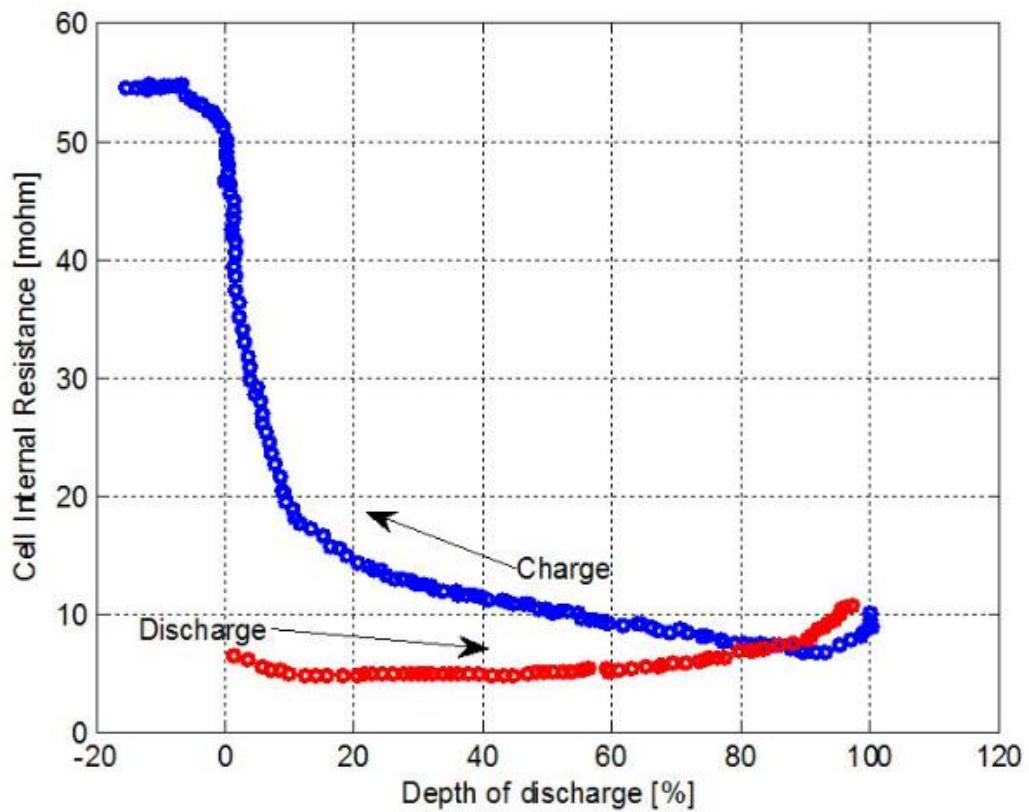
Při tvorbě BESS je třeba brát zřetel na dynamické vlastnosti systémů které budou do BESS aplikovány. Dynamické vlastnosti jako takové se skládají z mnoha faktorů a není zcela jednoduché mezi nimi často vytvořit metodiku srovnání. Obecně se dá říct, že na tyto vlastnosti se nechá dívat z více pohledů například na základě teoretických vlastností a vlastními které je možné změřit či dokumentovat. Teoretické vlastnosti jsou založené na chemické dynamiky a vlastností materiálů. Co se druhého typu vlastností týče jedná se o poměr namáhání a životnosti baterie. [62]

Problém těchto pohledů je jejich komplexnost a častá diametrální rozdílnost samotných elektrochemických článků, ty je těžké porovnávat na základě stejných podmínek. Je tedy potřeba stanovit metodiku řazení takovou která bude buď fixovaná na jednu problematiku a tím může dojít k vytvoření zdánlivé ideální technologie, nebo metodiku příliš obecnou a riskovat špatné rozdělení. Cílem všech těchto procesů by mělo být nalezení a určení nejoptimálnější technologie pro aplikaci elektrických uložišť a zajistit tak její ekonomickou rentabilitu.

Dle názoru autora jsou při tvorbě systému BESS nejvíce důležité parametry jako rychlost odezvy, stárnutí článku a bezpečnost. Vlastnosti jako hmotnost v poměru kapacity, nebo objem jsou u velkých systémů BESS zanedbatelné, neboť systémy jsou staticky na jednou místě tudíž nebudou tyto vlastnosti degradovat jejich aplikovatelnost.

6.1 Pb-acid

Pro olovené články platí, že jejich vnitřní odpor se mění společně s hodnotou DoD. To je vidět na Obr. 13. zde je vidět hysterezní smyčka která má uzel v hodnotách 80 % DoD. Tedy nejnižších hodnot odporu bude mít článek ve momentě těsně před vybitím. Nejvyšších naopak při plně nabitém článku. [2]

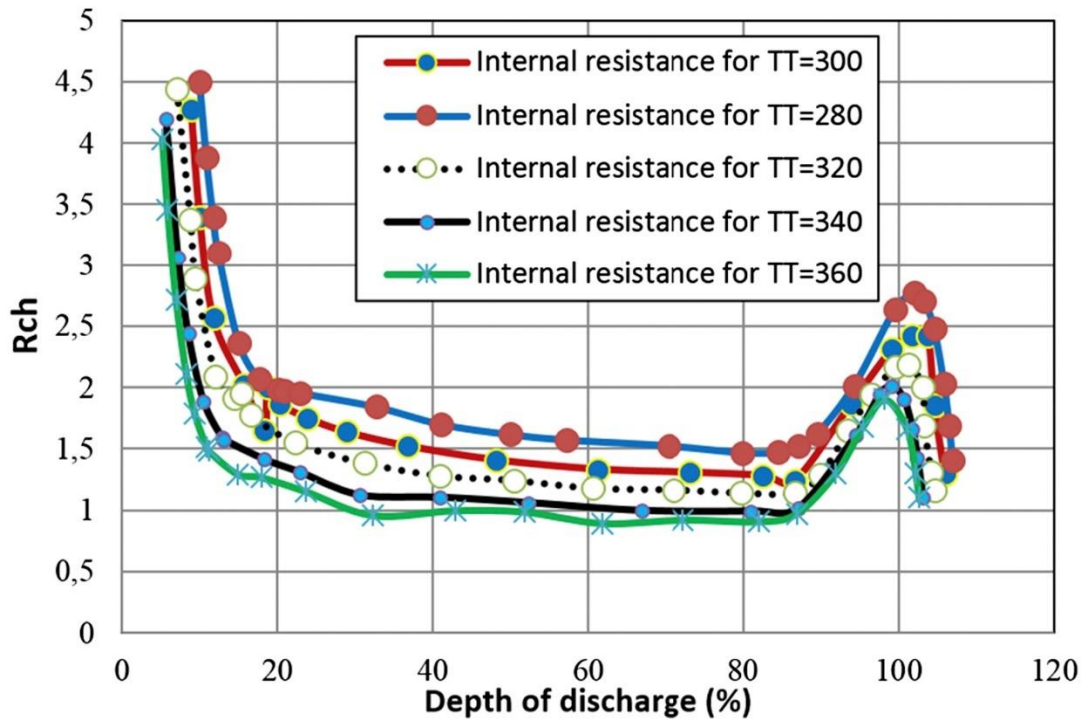


Obr. 13 Vnitřní odpor článku v závislosti na DoD [2]

6.2 NaS

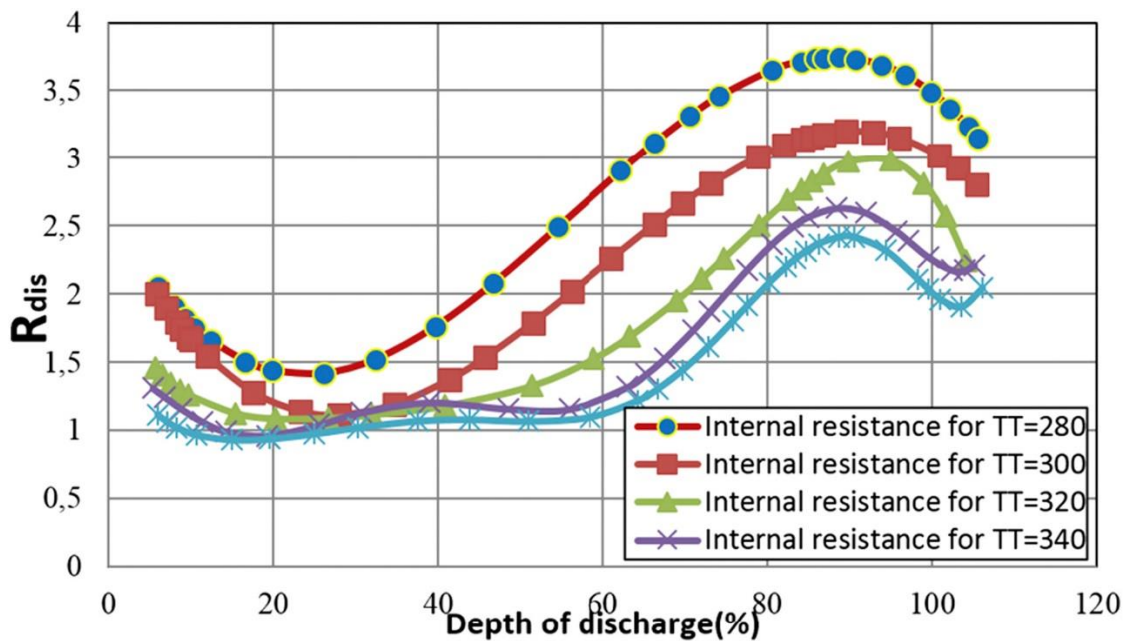
Vnitřní baterií NaS je závislí na teplotě, při které ke vybíjení nebo nabíjení dochází. Na obr. 14 je zřejmé, že je nutné články udržovat při určité teplotě v tomto případě při 360°C, aby bylo dosaženo co nejnižšího odporu.

To má za následek větších ztrát, také to ovlivní schopnost NaS jako zdroje výkonu rychle reagovat. [63]



Obr. 14 Opor NaS baterií v závislosti na DoD a teplotě při vybíjení

To samé se děje i při průběhu nabíjení kdy je výsledek stejný s klesající teplotou roste odpor článku, jak je vidět na obr. 15. [63]

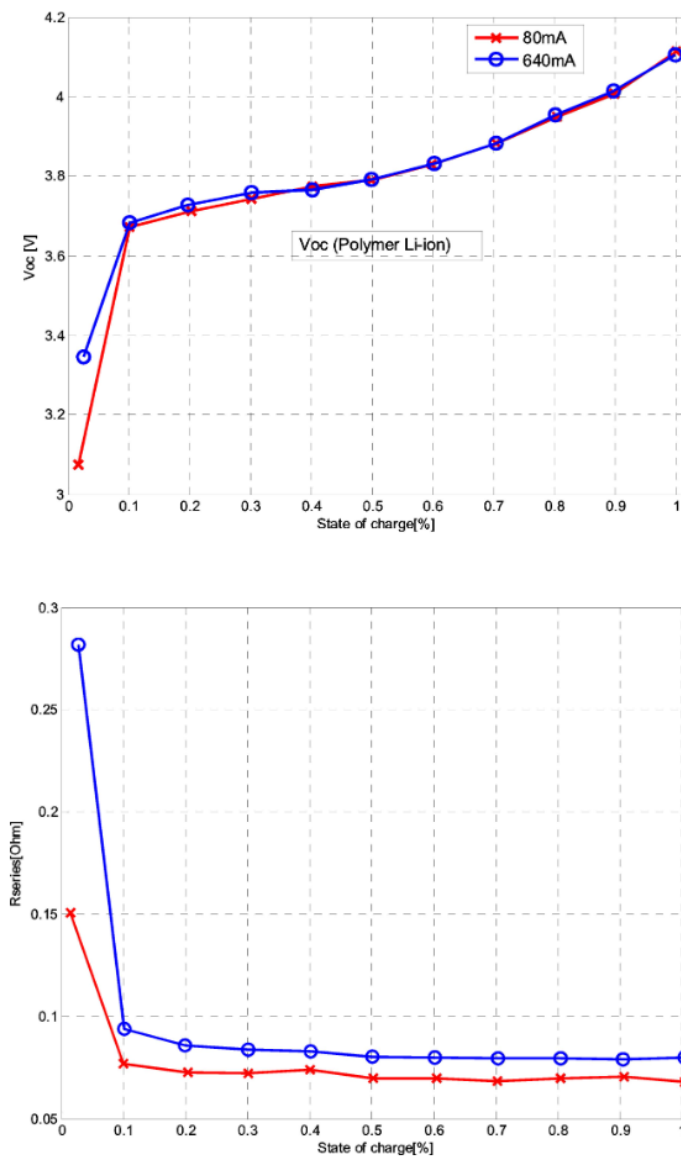


Obr. 15 Opor NaS baterií v závislosti na DoD a teplotě při nabíjení [63]

Pokud má být tento systém efektivní je třeba udržovat článek při vysokých teplotách.

6.3 Li-ion

Jedna z dynamických vlastností Li-ion baterií je jev při kterém budou hodnoty napětí na prázdko a hodnoty vnitřního odporu rozdílné při různých hodnotách nabití baterie. To je i vidět na Obr. 16 kde je vidět kolísání hodnot u Li-ion články s rozdílnou kapacitou. Jak je vidět na horním grafu hodnota napětí na prázdko roste téměř identicky na obou člancích. Za to vnitřní odpor je daleko větší u baterie s větší kapacitou. [2]



Obr. 16 Změny napětí na prázdko a vnitřního odporu v Li-ion baterii [2]

Zhodnocení a závěr

V úvodu práce je nastíněné, proč roste nutnost po neustálém vyvíjení bateriových systémů bez ohledu na jejich aplikaci, bateriové systémy jsou důležité pro budoucí vývoj nejen komerční elektroniky, ale i z hlediska energetiky. Konkrétní technologie akumulátorů a článků jsou rozebrány v kapitolách jedna až tři. Kde je vždy nastíněná technologie a uvedené její výhody a nevýhody. Dále je u nich uvedené, kde jsou dané technologie aplikovány případně v jakém odvětví se očekává jejich rozmach. Na konci každé kapitoly je pak srovnání jednotlivých typů mezi sebou.

Další část práce je věnována určení technologické úrovně připravenosti, ta je určená na základě předchozího přiblížení jednotlivých typů technologií baterií. Určení technologické připravenosti má svůj význam pro zhodnocení, v jaké vývojovém stadiu se technologie nachází. To je definováno pomocí škály od jedné do devíti a následně je každá technologie ohodnocena.

Poslední část práce je věnována porovnání dynamických vlastností bateriových technologií. Zde jsou uvedeny některé z dynamických vlastností pro olověné, lithiové a sodíkové baterie. Těchto vlastností je daleko více, zde se nachází jen některé pro přiblížení problematiky.

Literatura

- [1] Luo, X.; Wang, J.; Dooner, M.; Clarke, J. Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation. *Applied Energy*, 137(1), 2015, pp. 511-536. ISSN 0306-2619, doi: 10.1016/j.apenergy.2014.09.081
- [2] Sarasua, A. E.; Molina, M. G.; Mercado, P. E. Dynamic Modelling of Advanced Battery Energy Storage System for Grid-Tied AC Microgrid Applications. *Energy Storage*. Eds. Zobaa, A. F. London: IntechOpen, 2013, ISBN 978-953-51-6296, doi: 10.5772/52219
- [3] *BU-201: How does the Lead Acid Battery Work?* [online]. Vancouver: Battery University Group, 2021 [cit. 11.5.2022]. Dostupné z: <https://batteryuniversity.com/article/bu-201-how-does-the-lead-acid-battery-work>
- [4] *Baterie lead-carbon* [online]. Vlkoš: Ostrovní elektrárny, 2022 [cit. 11.5.2022]. Dostupné z: <https://www.ostrovni-elektrarny.cz/?baterie-lead-carbon-jpc-12v-100ah-p310056>
- [5] Yina, J.; Lin, N.; Zhanga, W. et al. Highly reversible lead-carbon battery anode with lead grafting on the carbon surface. *Journal of Energy Chemistry*, 27(6), 2018, pp. 1674-1683. ISSN 2095-4956, doi: 10.1016/j.jechem.2018.03.002
- [6] Šrubářová, P. *Jak funguje olověný akumulátor?* [online]. Praha: TZB-info, 2017, ISSN 1801-4399 [cit. 14.5.2022]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektriny/16090-jak-funguje-oloveny-akumulator>
- [7] Reichl, T. *Sodíkové baterie - konstrukce, princip činnosti a aplikace* [online]. Třebíč: OM Solutions s.r.o., 2015 [cit. 15.5.2022]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/akumulace-energie/sodikove-baterie-konstrukce-princip-cinnosti-a-aplikace>
- [8] Li, T.; Wang, Ch.; Wu W. et al. The latest advances in the critical factors (positive electrode, electrolytes, separators) for sodium-sulfur battery. *Journal of Alloys and Compounds*, 792, 2019, pp. 797-817. ISSN 0925-8388, doi: 10.1016/j.jallcom.2019.03.343
- [9] Bradford, P. R. Sodium-Sulfur (NaS) batteries for utility energy storage applications. *2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, 2008, pp. 1-2. ISSN: 1932-5517, doi: 10.1109/PES.2008.4596161

- [10] Galcerán, M. *Sodium-ion batteries: towards a sustainable, low-cost energy storage technology* [online]. Álava: CIC energiGUNE 2021 [cit. 17.5.2022]. Dostupné z: <https://cicenergigune.com/en/blog/sodium-ion-batteries-sustainable-lowcost-energy-storage-technology>
- [11] Libich, J.; Sedlaříková, M.; Vondrák, J.; Máca, J. et al. Sodno-iontové akumulátory - budoucnost a aktuální vývoj. 40. *Nekonvenční zdroje elektrické energie*. Brno: NZEE, 2019. pp. 74-77. ISBN: 978-80-02-02858-1.
- [12] Morris, J. *Rising Lithium Prices Could Stop The EV Revolution – Or Could They?* [online]. Forbes, 2022, ISSN 2609-1445 [cit. 19.5.2022]. Dostupné z: <https://www.forbes.com/sites/jamesmorris/2022/04/16/rising-lithium-prices-could-stop-the-ev-revolution--or-could-they/?sh=45152bb97125>
- [13] Chen, X.; Shen, W.; Cao, Z. et al. An overview of lithium-ion batteries for electric vehicles. *2012 10th International Power & Energy Conference (IPEC)*, 2012, pp. 230-235, ISBN:978-1-4673-4584-2, doi: 10.1109/ASSCC.2012.6523269
- [14] Talens Peiró, L.; Villalba Méndez, G.; Ayres, R. U. Lithium: Sources, Production, Uses, and Recovery Outlook. *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*, 2013, 65, pp. 986–996. ISSN 1543-1851, doi: 10.1007/s11837-013-0666-4
- [15] Claus, D. Materials and processing for lithium-ion batteries. *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*, 2008, 60, pp. 43–48. ISSN 1543-1851, doi: 10.1007/s11837-008-0116-x
- [16] *LMO Batteries* [online]. Sinovoltaics Group, 2020 [cit. 20.5.2022]. Dostupné z: <https://sinovoltaics.com/learning-center/storage/lmo-batteries/>
- [17] Ansari, A. B.; Esfahanian, V.; Torabi, F. Discharge, rest and charge simulation of lead-acid batteries using an efficient reduced order model based on proper orthogonal decomposition. *Applied Energy*, 2016, 173, pp. ISSN: 0306-2619, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.04.008
- [18] Zhu, H. W.; Zhu, Y.; Tatarchuk, B. J. A simplified equivalent circuit model for simulation of Pb–acid batteries at load for energy storage application. *Energy Conversion and Management*, 2011, 52 (8–9), pp. 2794-2799. ISSN: 0196-8904, doi: 10.1016/j.enconman.2011.02.013
- [19] Fan, X.; Liu, B.; Liu, J. et al. Battery Technologies for Grid-Level Large-Scale Electrical Energy Storage. *Transactions of Tianjin University*, 2020, 26, pp. 92–103. ISSN 1006-4982, doi: 10.1007/s12209-019-00231-w

- [20] Young K.; Yasuoka S. Capacity Degradation Mechanisms in Nickel/Metal Hydride Batteries. *Batteries*, 2016; 2(1), pp. 3. ISSN 2313-0105, doi: 10.3390/batteries2010003
- [21] Belgacem, Y. B.; Khaldi, Ch.; Lamloumi, J. The effect of the discharge rate on the electrochemical properties of AB₃-type hydrogen storage alloy as anode in nickel–metal hydride batteries. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(17), pp. 12797-12807. ISSN 0360-3199, doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.12.143
- [22] Wang, L.; Wang, J.; Zhang, M. et al. A critical review on nickel-based cathodes in rechargeable batteries. *International Journal of Minerals*, 2022, 29, pp. 925–941. ISSN 1674-4799, doi: 10.1007/s12613-022-2446-z
- [23] Nikiforidis, G.; Sanden, M. C. M.; Tsampas, M. N. High and intermediate temperature sodium–sulfur batteries for energy storage: development, challenges and perspectives. *RSC Advances*, 2019, 9, pp. 5649-5673. ISSN 2046-2069 , doi: 10.1039/C8RA08658C
- [24] Nayak, P. K.; Yang, L.; B. Wolfgang et al. From Lithium-Ion to Sodium-Ion Batteries: Advantages, Challenges, and Surprise. *Angewandte Chemie International Edition*, 2018, 57(1), pp. 102-120. doi: 10.1002/anie.201703772
- [25] Yang, Ch.; Xin, S.; Mai, L.; You, Y. Materials Design for High-Safety Sodium-Ion Battery. *Advanced Energy Materials*, 2021, 11, 2000974. ISSN: 1614-6840, doi: 10.1002/aenm.202000974
- [26] Zubi, G.; Dufo-López, R.; Carvalho, M. et al. The lithium-ion battery: State of the art and future perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 89, pp. 292-308. ISSN 1364-0321, doi:10.1016/j.rser.2018.03.002
- [27] Ambrose, H.; Kendall, A. Understanding the future of lithium: Part 1, resource model. *Journal of Industrial Ecology*, 2020, 24, pp. 80– 89. ISSN: 1530-9290, doi: 10.1111/jiec.12949
- [28] Chen, S.; Yang, X.; Zhang, J. et al. Aluminum–lithium alloy as a stable and reversible anode for lithium batteries. *Electrochimica Acta*, 2021, 368, 137626. ISSN 0013-4686, doi: 10.1016/j.electacta.2020.137626
- [29] Behi, H.; Karimi, D.; Kalogiannis, T. et al. Advanced hybrid thermal management system for LTO battery module under fast charging. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2022, 33, 101938. ISSN 2214-157X, doi: 10.1016/j.csite.2022.101938
- [30] Zhang, H.; Yang, Y.; Xu, H. et al. Li₄Ti₅O₁₂ spinel anode: Fundamentals and advances in rechargeable batteries. *InfoMat*, 2022; 4(4), e12228. ISSN:2567-3165, doi: 10.1002/inf2.12228

- [31] Li, T.; Yuan, X. Z.; Zhang, L. et al. Degradation Mechanisms and Mitigation Strategies of Nickel-Rich NMC-Based Lithium-Ion Batteries. *Electrochemical Energy Reviews*, 2020, 3, pp. 43–80, ISSN 2520-8489, doi: 10.1007/s41918-019-00053-3
- [32] Schmitt, J.; Maheshwari, A.; Heck, M. et al. Impedance change and capacity fade of lithium nickel manganese cobalt oxide-based batteries during calendar aging. *Journal of Power Sources*, 2017, 353, pp. 183-194. ISSN 0378-7753, doi: 10.1016/j.jpowsour.2017.03.090
- [33] Golubkov, A. W.; Fuchs, D.; Wagner, J. Thermal-runaway experiments on consumer Li-ion batteries with metal-oxide and olivin-type cathodes. *RSC Advances*, 2014, 4, pp. 3633-3642. ISSN 2046-2069, doi: 10.1039/C3RA45748F
- [34] Nizam, M.; Maghfiroh, H.; Rosadi R. A. et al. Design of Battery Management System (BMS) for Lithium Iron Phosphate (LFP) Battery. *6th International Conference on Electric Vehicular Technology (ICEVT)*, 2019, pp. 170-174, doi: 10.1109/ICEVT48285.2019.8994002
- [35] Pena-Bello, A.; Barbour, E.; Gonzalez, M. C. et al. Optimized PV-coupled battery systems for combining applications: Impact of battery technology and geography. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 112, pp. 978-990. ISSN 1364-0321, doi: 10.1016/j.rser.2019.06.003
- [36] Julien, CH. M.; Mauger, A. NCA, NCM811, and the Route to Ni-Richer Lithium-Ion Batteries. *Energies*, 2020, 13(23), 6363. ISSN 1996-1073, doi: 10.3390/en13236363
- [37] Deng, N.; Liu, Y.; Li, Q. et al. Functional mechanism analysis and customized structure design of interlayers for high performance Li-S battery. *Energy Storage Materials*, 2019, 23, pp. 314-349. ISSN 2405-8297, doi: 10.1016/j.ensm.2019.04.042
- [38] Miao, Y.; Hynan, P.; Jouanne, A. et al. Current Li-Ion Battery Technologies in Electric Vehicles and Opportunities for Advancements. *Energies*, 2019, 12(6), 1074. ISSN 1996-1073, doi: 10.3390/en12061074
- [39] Gao, Y.; Guo, Q.; Zhang Q. et al. Fibrous Materials for Flexible Li–S Battery. *Advanced Energy Materials*, 2021, 11, 2002580. ISSN 1614-6840, doi: 10.1002/aenm.202002580
- [40] Richter, K. Waldmann, T. Paul, N. et al. Low-Temperature Charging and Aging Mechanisms of Si/C Composite Anodes in Li-Ion Batteries: An Operando Neutron Scattering Study. *ChemSusChem*, 2020, 13, 529. ISSN 1864-564X, doi: 10.1002/cssc.201903139
- [41] Soltani, M.; Ronsmans, J.; Kakihara, S. et al. Open Access Article Hybrid Battery/Lithium-Ion Capacitor Energy Storage System for a Pure Electric Bus for an

- Urban Transportation Application. *Applied Sciences*, 2018, 8(7), 1176. ISSN 2076-3417, doi: 10.3390/app8071176
- [42] Zou, K.; Cai, P.; Cao, X. et al. Carbon materials for high-performance lithium-ion capacitor. *Current Opinion in Electrochemistry*, 2020, 21, pp. 31-39. ISSN 2451-9103, doi: 10.1016/j.coelec.2020.01.005
- [43] Durmus, Y. E.; Zhang, H.; Baakes, F. et al. Side by Side Battery Technologies with Lithium-Ion Based Batteries. *Advanced Energy Materials*, 2020, 10, 2000089. ISSN: 1614-6840, doi: 10.1002/aenm.202000089
- [44] Hsieh, I. L.; Pan, M. S.; Chiang, Y. M. et al. Learning only buys you so much: Practical limits on battery price reduction. *Applied Energy*, 2019, 239, pp. 218-224, ISSN 0306-2619, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.01.138
- [45] Wei, Z.; Ren, Y.; Sokolowski, J. et al. Mechanistic understanding of the role separators playing in advanced lithium-sulfur batteries. *InfoMat*, 2020, 2, pp. 483– 508. ISSN:2567-3165, doi: 10.1002/inf2.12097
- [46] Li, G.; Chen, Z.; Lu, J. Lithium-Sulfur Batteries for Commercial Applications. *Chem*, 2018, 4(1), pp. 3-7, doi: 10.1016/j.chempr.2017.12.012
- [47] Chen, T.; Jin, Y.; Lv, H. et al. Applications of Lithium-Ion Batteries in Grid-Scale Energy Storage Systems. *Transactions of Tianjin University*, 2020, 26, pp. 208–217. ISSN 1006-4982, doi: 10.1007/s12209-020-00236-w
- [48] Rankin, J. *MEPs vote to end sale of petrol and diesel car by 2035 in EU* [online]. The Guardian, 2022 [cit. 14.6.2022]. Dostupné z: <https://www.theguardian.com/world/2022/jun/08/meps-reject-key-eu-climate-proposal-watered-down-european-emissions-trading-system>
- [49] Wang, W.; Luo, Q.; Li, B. et al. Recent Progress in Redox Flow Battery Research and Development. *Advanced Functional Materials*, 2013, 23, 970-986. ISSN 1616-3028, doi: 10.1002/adfm.201200694
- [50] Zhang, H.; Lu, W.; Li, W. Progress and Perspectives of Flow Battery Technologies. *Electrochemical Energy Reviews*, 2019, 2, pp. 492–506. ISSN 2520-8489, doi: 10.1007/s41918-019-00047-1
- [51] Skyllas-Kazacos, M.; Chakrabarti, M. H.; Hajimolana S. A et al. Progress in Flow Battery Research and Development. *Journal of The Electrochemical Society*, 2011, 158 (8). ISSN 1945-7111, doi: 10.1149/1.3599565

- [52] Lourenssen, K.; Williams, J.; Ahmadpour, F. et al. Vanadium redox flow batteries: A comprehensive review. *Journal of Energy Storage*, 2019, 25, 100844. ISSN 2352-152X, doi: 10.1016/j.est.2019.100844
- [53] Jiang, H. R.; Sun, J.; Wei, L. et al. A high power density and long cycle life vanadium redox flow battery. *Energy Storage Materials*, 2020, 24, pp. 529-540. ISSN 2405-8297, doi: 10.1016/j.ensm.2019.07.005
- [54] Xu, Z.; Fan, Q.; Li, Y. et al. Review of zinc dendrite formation in zinc bromine redox flow battery. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, 127, 109838. ISSN 1364-0321, doi: 10.1016/j.rser.2020.109838
- [55] Xiang, H. X.; Tan, A. D.; Piao, J. H. et al. Efficient Nitrogen-Doped Carbon for Zinc–Bromine Flow Battery. *Small*, 2019, 15, 1901848. ISSN: 1613-6829, doi: 10.1002/sml.201901848
- [56] Li, Z.; Lu, Y. Ch. Polysulfide-based redox flow batteries with long life and low levelized cost enabled by charge-reinforced ion-selective membranes. *Nat Energy*, 2021, 6, pp. 517–528. ISSN 2058-7546, doi: 10.1038/s41560-021-00804-x
- [57] Ok, B.; Na, W.; Kwon, T. H. et al. Understanding the enhanced electrochemical performance of TEMPO derivatives in non-aqueous lithium ion redox flow batteries. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2019, 80, pp. 545-550. ISSN: 1226-086X, doi: 10.1016/j.jiec.2019.08.027
- [58] Pham-Truong, T. N.; Wang, Q.; Ghilane, J. et al. Recent Advances in the Development of Organic and Organometallic Redox Shuttles for Lithium-Ion Redox Flow Batteries. *ChemSusChem*, 2020, 13, 2142. ISSN 1864-564X, doi: 10.1002/cssc.201903379
- [59] Arenas, L. F.; Ponce de León, C.; Walsh F. C. Redox flow batteries for energy storage: their promise, achievements and challenges. *Current Opinion in Electrochemistry*, 2019, 16, pp. 117-126. ISSN 2451-9103, doi: 10.1016/j.coelec.2019.05.007
- [60] Shi, Y.; Eze, Ch.; Xiong, B. et al. Recent development of membrane for vanadium redox flow battery applications: A review. *Applied Energy*, 2019, 238, pp. 202-224. ISSN 0306-2619, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.12.087
- [61] Kendall, M.; Vilayanur, V.; Balducci, P. J. et al. *Energy Storage Technology and Cost Characterization Report* [online]. 2019 [cit. 14.6.2022]. Dostupné z: <https://www.osti.gov/biblio/1573487>

- [62] Fioriti, D., Pellegrino, L., Lutzemberger, G., Micolano, E., & Poli, D. (2022). Optimal sizing of residential battery systems with multi-year dynamics and a novel rainflow-based model of storage degradation: An extensive Italian case study. *Electric Power Systems Research*, 203, 107675. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107675>
- [63] Rodrigues, E. M. G., Osório, G. J., Godina, R., Bizuayehu, A. W., Lujano-Rojas, J. M., Matias, J. C. O., & Catalão, J. P. S. (2015). Modelling and sizing of NaS (sodium sulfur) battery energy storage system for extending wind power performance in Crete Island. *Energy*, 90, 1606–1617. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.06.116>

Seznam tabulek

Tabulka 1 Porovnání počtu cyklů pro startovací a trakční olověné baterie.....	1
Tabulka 2 Hodnoty kapacit při rozdílné rychlosti vybíjení.....	9
Tabulka 3 Porovnání typů akumulátorů typu PB, Ni a N.....	13
Tabulka 4 Srovnání lithiových baterií.....	24
Tabulka 5 Srovnání průtokových baterií.....	32
Tabulka 6 Stupnice připravenosti technologie.....	33
Tabulka 7 Určení technologické připravenosti bateriových systémů a jejich náklady....	34

Seznam obrázků

Obr. 1 Schéma provozu bateriového systému skladování energie	1
Obr. 2 Využití elektrod v závislosti na vybíjení.....	4
Obr. 3 Hodnoty kapacit článků při rostoucím počtu cyklů.....	6
Obr. 4 Aktivace Ni-MH s CeY_2Ni_9 při různých rychlostech vybíjení.....	9
Obr. 5 Chemická reakce probíhající v sodíkové baterii při jeho vybíjecím cyklu.....	11
Obr. 6 Chemický princip článku.....	13
Obr. 7 Uložení li-ion článku v baterii.....	15
Obr. 8 Chemická reakce v li-ion člancích.....	17
Obr. 9 Vrstvy materiálu v Li-S článku s nano vlákny.....	22
Obr. 10 Schéma RFB.....	26
Obr. 11 Pohyb iontu ve VRBF skrze separátor.....	28
Obr. 12 Schéma systému Li-RFB.....	31
Obr. 23 Vnitřní odpor článku v závislosti na DoD.....	37
Obr. 14 Opor NaS baterií v závislosti na DoD a teplotě při vybíjení.....	38
Obr. 15 Opor NaS baterií v závislosti na DoD a teplotě při nabíjení.....	39
Obr. 16 Změny napětí na prázdko a vnitřního odporu v Li-ion baterii.....	