



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY

A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

BATERIOVÉ ÚLOŽIŠTĚ S AKUMULÁTORY V DRUHÉM ŽIVOTNÍM CYKLU

BATTERY STORAGE WITH SECOND LIFE CYCLE BATTERIES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Dominik Král

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Procházka, Ph.D.

BRNO 2023



Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Dominik Král
Ročník: 3

ID: 230388
Akademický rok: 2022/23

NÁZEV TÉMATU:

Bateriové úložiště s akumulátory v druhém životním cyklu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Seznamte se s problematikou a stavy akumulátorů po 1. životním cyklu.
2. Definujte testy pro vyhodnocení stavu akumulátorů před použitím v 2. životním cyklu.
3. Navrhněte blokové zapojení energetického úložiště.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Mubenga, N.S.; Stuart, T. Capacity Measurements for SecondLife EV Batteries. *Electricity* 2022, 3, 396–409. <https://doi.org/10.3390/electricity3030021>.
- [2] Seongyun Park; Jeongho Ahn; Taewoo Kang; Sungbeak Park; Youngmi Kim; Inho Cho; Jonghoon Kim, Review of state-of-the-art battery state estimation technologies for battery management systems of stationary energy storage systems, *Journal of Power Electronics* 2020, DOI: 10.1007/s43236-020-00122-7.
- [3] Wei Liu; Tobias Placke; K.T. Chau; Overview of batteries and battery management for electric vehicles; *Energy Reports* Volume 8, November 2022, Pages 4058-4084; <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.03.016>

Termín zadání: 6.2.2023

Termín odevzdání: 29.5.2023

Vedoucí práce: Ing. Petr Procházka, Ph.D.

prof. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Abstrakt

Bakalářská práce pojednává o problematice spojené s řešením energetických uložišť. Zabývá se rozбором využívaných typů akumulátorů, zaobírá se jejich výhodami, nevýhodami, na jakém principu fungují. Je zaměřena na možnosti a problematiku využití akumulátorů v režimu „Second life“. Je zde představen následný proces přípravy baterií pro další aplikaci a definované testy nutné pro vyhodnocení stavu akumulátorů před dalším použitím. V závěru jsou provedeny samotné návrhy energetických uložišť a topologie blokového zapojení energetického uložišť.

Klíčová slova

Akumulátory, energetické uložišť, second life, problematika uložišť, baterie, akumulace elektrické energie, SOH, SOC, SOF, SOT, blokové zapojení.

Abstract

The bachelor thesis deals with problems related to the solution of energy storage. It deals with the analysis of used types of accumulators, deals with their advantages, disadvantages, on what principle they work. It focuses on the possibilities and problems of using batteries in the "Second life" mode. It presents the subsequent process of preparing batteries for further application and defines the tests necessary to evaluate the condition of batteries before further use. Finally, the actual energy storage designs and the block topology of the energy storage are presented.

Keywords

Batteries, energy storage, second life, storage issues, batteries, energy storage, SOH, SOC, SOF, SOT, block diagram.

Bibliografická citace

KRÁL, Dominik. *Bateriové úložiště s akumulátory v druhém životním cyklu* [online]. Brno, 2023 [cit. 2023-05-29]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/151634>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. Vedoucí práce Petr Procházka.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	Dominik Král
VUT ID studenta:	230388
Typ práce:	Bakalářská práce
Akademický rok:	2022/2023
Téma závěrečné práce:	Bateriové úložiště s akumulátory v druhém životním cyklu

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 29 května 2023

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Petru Procházkovi Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne: 29. května 2023

podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	9
SEZNAM TABULEK	10
ÚVOD.....	11
1. AKUMULÁTORY NA ELEKTROCHEMICKÉ BÁZI	12
1.1 OLOVĚNÉ (KYSELÉ) AKUMULÁTORY	12
1.2 ALKALICKÉ AKUMULÁTORY	14
1.2.1 NiCd (nikl-kadmiové)	14
1.2.2 NiMH (nikl-metalhydridové).....	15
1.2.3 NiZn (nikl – zinkové)	16
1.3 LI-ION AKUMULÁTORY	16
1.3.1 lithium-železofosfát LiFePO4 (LFP)	18
1.3.2 Lithium kobalt – LiCoO2 (LCO).....	19
1.3.3 Lithium manganový (LMO).....	19
1.3.4 Lithium nikl mangan kobalt (NMC).....	19
1.3.5 Lithium nikl kobalt aluminium – LiNiCoAlO2 (NCA)	19
1.3.6 Lithium-titan (Li2TiO3) LTO.....	20
1.4 LITHIUM-POLYMER	20
1.5 PRŮTOKOVÉ BATERIE	21
1.6 BATERIE SODIUM-SULFUR (NAS)	23
2. SUPERKONDENZÁTORY.....	25
2.1 STRUKTURA A PRINCIP FUNKCE	25
2.2 POUŽITÍ SUPERKONDEZÁTORU	26
3. SECOND LIFE	27
3.1 PROCES REPASOVÁNÍ BATERIÍ.....	27
3.2 BATERIOVÝ SYSTÉM SKLADOVÁNÍ ENERGIE	30
3.2.1 Základní topologie stacionárního bateriového úložného systému.....	30
3.3 MOŽNOSTI POUŽITÍ	32
4. TESTY PRO VYHODNOCENÍ STAVU AKUMULÁTORŮ PŘED POUŽITÍM.....	33
4.1 STATE OF CHARGE (SOC)	33
4.2 STATE OF HEALTH (SOH)	35
4.3 STATE OF FUNCTION (SOF)	37
4.4 STATE OF TEMPERATURE (SOT).....	37
5. NÁVRH BATERIOVÉ ÚLOŽIŠTĚ S AKUMULÁTORY V DRUHÉM ŽIVOTNÍM CYKLU..	39
ZÁVĚR.....	47
LITERATURA.....	48
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	51

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Konstrukce olověného akumulátoru [4]	13
1.2	Struktura li-ion akumulátoru [11]	18
1.3	Konstrukce průtokové baterie [19].....	22
1.4	Schéma baterie NaS s principem nabíjení/vybíjení [22].....	24
2.1	Struktura superkondenzátoru [26].....	25
3.1	Typy článků: A) Cylindrické, B) Prismatická, C) Pouch[29]	28
3.2	Zjednodušené schéma procesu zpracování baterií [31]	29
3.3	Architektura bateriového systému skladování energie [34].....	31
4.1	Porovnání vybíjecí charakteristiky li-ion a olověné baterie. [38]	34
5.1	Příkladový návrh blokového zapojení energetického uložště	41

SEZNAM TABULEK

1.1	Počet nabíjecích cyklů startovací a trakční baterie [2]	13
1.2	Shrnutí charakteristických hodnot pro olověný akumulátor:	14
1.2	Základní charakteristické hodnoty pro NiCd akumulátory	15
1.4	Základní charakteristické parametry pro NiMH:	16
1.5	Stručné porovnání typů li-ion akumulátorů	20
2.1	Parametry superkondenzátoru [27]	26
5.1	Návrh uložště č.1 o požadované velikosti 12kWh za využití LiFePO4 baterií.	39
5.2	Návrh uložště č.2 o požadované velikosti 12kWh za využití prizmatických článků Molicel.	42
5.3	Návrh uložště č.3 o požadované velikosti 4kWh s využitím olověných baterií typu OTL100-12. .	43
5.4	Návrh uložště č.4 o požadované velikosti 4kWh s využitím olověných baterií typu F1	44
5.5	Návrh uložště č.5 o požadované velikosti 8kWh s využitím olověných baterií typu OTL100-12. .	45
5.6	Návrh uložště č.6 o požadované velikosti 8kWh s využitím olověných baterií typu F1	46

ÚVOD

V bakalářské práci budou nastíněny informace o jednotlivých typech používaných akumulátorů, principu jejich funkce, a navíc zde budou představeny výhody a nevýhody, které se pojí s jejich užíváním.

V poslední době dochází k poměrně velkému nárůstu užívání akumulátorů, nejvíce to můžeme zaznamenat u lithium-iontových akumulátorů (Li-ion), s kterými se můžeme setkat podstatě v každém odvětví. Své místo našly ve spotřební elektrotechnice a samozřejmě v rozrůstajícím se elektromobilovém průmyslu.

S růstem počtu vyrobených akumulátorů stoupá otázka, co je s nimi možné dělat v případě, že se jejich kapacita sníží natolik, kdy následně bude nemožné používat akumulátory k prvotně určené aplikaci, ke které byly původně určeny.

Z tohoto důvodu je práce věnována možnosti druhotného využití neboli využití akumulátorů v režimu „second life“, který by mohl umožnit využití akumulátoru ve fázi, kdy ho již nemůžeme použít k původním účelům, přičemž je zde ještě poměrně velká kapacita, která by mohla být využita pro jinou aplikaci před tím, než projde akumulátor recyklací, popřípadě úplnou likvidací.

Před samotným procesem aplikace článků po prvním životním cyklu bude nutné provést definování testů pro vyhodnocení stavu akumulátorů, aby bylo možné určit vhodnost způsobilosti článků pro následné použití.

V reakci na rozrůstající se rozmach elektráren na bázi obnovitelných zdrojů a požadavku na zvýšení efektivnosti využití elektrické energie v časech, kdy je generován její nadbytek, který není možné v daném čase využít. V závislosti nad tímto požadavkem, dochází ke zvyšující poptávce po energetických uložistiích.

Z toho důvodu se práce zabývá také samotným sestavením skladovacího systému elektrické energie, z čeho se takový systém skládá. Jsou zde představeny přínosy tvorby jednotlivých větších i menších akumulátorových uložistií s druhotně využitými bateriemi, což by mohlo mít následně dopad na snížení těžby a nutné výroby nových akumulátorů a tím i kladný dopad na životní prostředí. Práce se bude zabývat také i dalšími možnostmi akumulace elektrické energie.

Bude zde přiblíženo uplatnění jednotlivých typů uložistií. Jejich následné možné využití například ve spojení s výrobou elektrické energie na bázi obnovitelných zdrojů až po aplikaci uložistií, které by napomáhaly ke stabilizaci sítě při výkyvech.

Hlavním cílem této bakalářské práce je seznámení s problematikou a možnostmi v oblasti řešení energetických uložistií a akumulátorů v druhém životním cyklu. Provedení definování testů vyhodnocení stavu akumulátorů před použitím v 2. životním cyklu a následné provedení možných návrhů energetických uložistií s představením blokového zapojení uložistií.

1. AKUMULÁTORY NA ELEKTROCHEMICKÉ BÁZI

Uložiště elektrické energie se dělí primárně do tří skupin. Jsou rozděleny na primární články zvané hovorově také jako baterie, na sekundární články neboli akumulátory, třetí skupinou jsou články palivové [1].

Primární články hovorově také jako baterie, které při jejich vybití mění reaktanty na produkty, které poté již nemůžeme zpětně dodáním elektrického proudu nabíjet. Jde tedy o články na jedno nabití. Články fungují na bázi solného elektrolytu, alkalického elektrolytu, nebo bývá využívána báze na základě aprotických rozpouštědel [1].

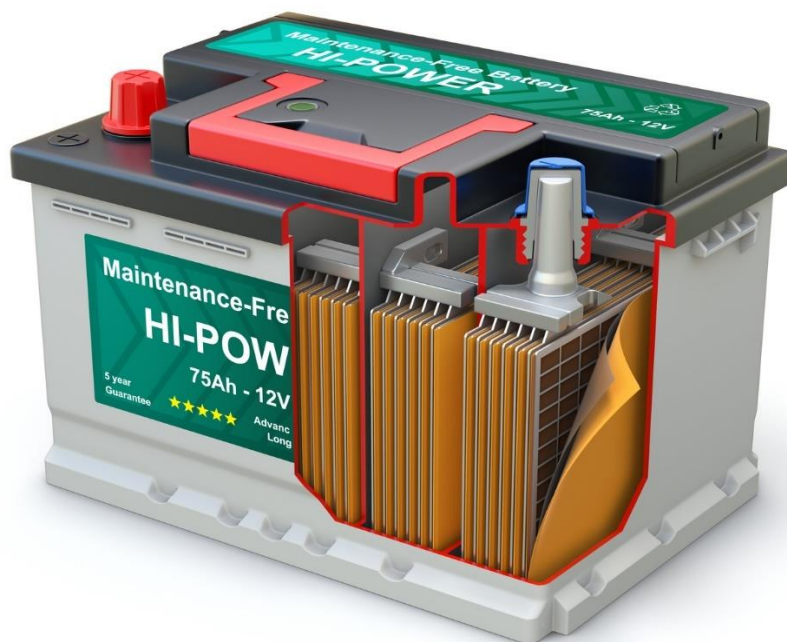
Sekundární články neboli akumulátory jsou zařízení, která dokážou reakční produkty vzniklé při vybití přivést na původní aktivní reaktanty. Při nabíjení dochází znovu k akumulaci elektrické energie, která je zde uložena ve formě chemické energie. Tyto samotné akumulátory můžeme rozdělit na akumulátory alkalické (Ni-Cd, Ni-Fe, Ni-MH, Ni-Zn, Ag-Zn), olověné, lithium-iontové. Podle charakteristiky a typu elektrolytu dokážou tyto sekundární články stovky až tisíce cyklů neboli nabití-vybití, podle čehož určujeme životnost těchto akumulátorů [1].

Třetí skupina je tvořena palivovými články, které fungují na bázi tzv. studeného spalování paliva, která vytváří elektrický proud [1].

1.1 Olověné (kyselé) akumulátory

Jedná se historicky o první nabíjecí komerčně využitou akumulátorovou baterii, která byla vynalezena v roce 1859 fyzikem Gastonem Planté. Dodnes jsou ještě hojně využívány tyto akumulátory na bázi chemických sloučenin olova. Hlavně díky jejich spolehlivosti a levné ceně vztažené k jednomu wattu.[2] Ukázaly se jako velmi cenově efektivní při využití pro automobily, vysokozdvizné vozíky, lodě a také pro záložní zdroje. Výhodou těchto akumulátorů je možnost dodávání velkého nárazového proudu a poměrně velkého nominálního napětí na jeden článek 2,1V/článek, ze kterých se poté sestavují jednotlivé baterie, abychom dostali potřebné hodnoty napětí a proudu.[2] Vyráběny jsou o od 1 do 10 000 Ah.[1]

Jako materiál pro elektrody se zde používá porézní (houbovitě) olovo u záporných elektrod, u kladné elektrody je aktivní hmotou oxid olovičitý, jelikož je samo o sobě olovo velmi měkké, tak aby se zvýšila mechanická pevnost, tak bývá obohaceno o různé příměsi, nejběžněji je používán antimon, selen, cín a vápník. Dnes je již často v moderních akumulátorech z důvodu snížení antimonu a vápníku používán selen, kadmium, cín nebo arzen. Pokud je využita koncepce přidání antimonu a cínu tak dochází ke zlepšení životnosti, ale zvyšuje spotřebu vody a nutnost častějšího vyrovnávacího nabíjení. Když je použita metoda obohacení o vápník, dochází sice ke snížení samovybití, ale dochází k zvětšení vlivu oxidace mřížky.[2]



Obrázek 1.1 Konstrukce olověného akumulátoru [4]

Složkou elektrolytu je zde použita vodou zředěná kyselina sírová. Hlavním principem funkce akumulátoru je uchování elektrické energie v chemické sloučenině, kdy při nabíjení dochází k tvorbě kyseliny sírové a díky tomu dochází k houstnutí elektrolytu. Na kladné elektrodě se vytvoří tmavohnědý oxid olovičitý a na záporné tmavošedé olovo.[3]

Olověné akumulátory nejsou vhodné k rychlému nabití, úplné nabití může trvat až 14-16hod. Při nabíjení je nutné dodržet mezní hodnoty napětí. Při nízkém limitu napětí je baterie více chráněna, ale je snížena výkonnost a dochází k sulfataci, přičemž při vysokém limitu napětí je zvýšena výkonnost, ale dochází ke korozi, která může být pro baterii nebezpečnější než sulfatace, jelikož ji nelze odstranit.[2]

Životnost baterie je samozřejmě spojena s velikostí vybití (viz. tabulka 1.1), nesvědčí jim úplné vybití, protože díky tomu dochází k nevratným změnám v životnosti a dochází ke snížení počtu možných cyklů nabití/vybití. Velikou výhodou je jejich pomalé samovybití a práce v chladných teplotách až $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$. [2]

Tabulka 1.1 Počet nabíjecích cyklů startovací a trakční baterie [2]

Hloubka vybití	Startovací baterie	Trakční baterie
100 %	12-15 cyklů	150-200 cyklů
50 %	100-120 cyklů	400-500 cyklů
30 %	130-150 cyklů	1000 a více cyklů

Výhody a nevýhody

Výhodou u těchto akumulátorů je jejich cena, nízké náklady za watthodinu, pomalé samovybití, velký měrný výkon, schopnost velkých vybíjecích proudů, dobré vlastnosti při vysokých a nízkých teplotách, velký podíl recyklace článků až 99 %, nízký vnitřní odpor. [2]

Nevýhody jsou zajisté: pomalé nabíjení, špatný poměr hmotnosti k energii, při plném vybití se snižuje životnost, není šetrný k životnímu prostředí, nízká měrná hustota energie, velká hmotnost.[2]

Tabulka 1.2 Shrnutí charakteristických hodnot pro olověný akumulátor:

Hustota energie [Wh/kg]	30-45 [1]
Počet cyklů [-]	300 [2]
Nominální napětí [V]	2,1/článek [2]
Teplotní pracovní rozsah [°C]	od -25 do +50 [3]
Vybíjecí proud [násobky C]	až 10 C [3]

1.2 Alkalické akumulátory

Jedná se o hermeticky uzavřené akumulátory, nedochází k úniku plynu ani kapaliny, není zde vyžadováno po celou dobu jejich životnosti doplňování elektrolytu. Společným znakem alkalických akumulátorů je tedy elektrolyt, zpravidla se jedná o vodný roztok hydroxidu alkalického kovu, což bývá nejčastěji hydroxid draselný. Podle aktivních hmot využívaných u kladných a záporných elektrod se rozdělují hned na několik typů: nikel-kadmiové (NiCd), nikel-železné (NiFe), stříbro-zinkové (Ag-Zn), nikel-metalhydridové (NiMH), nikel-zinkové (NiZn), stříbro-kadmiové (Ag-Cd). [1]

1.2.1 NiCd (nikel-kadmiové)

Stal se prvním využívaným alkalickým akumulátorem, původně byl využíván pouze pro armádní účely, ale poté se rozšířil i do civilního komerčního sektoru. Své využití našel v letadlech, kosmické a vojenské technice.[5] Díky toxickému kadmiu se od něj upustilo v komerčním využití a je již využíván pouze v průmyslových aplikacích.

Elektrolytickou aktivní složkou je zde nejvíce využíván hydroxid draselný (KOH), který je rozpuštěný ve vodě, jehož nosičem jsou vložené separátory, které slouží primárně také k oddělení elektrodového systému. Aktivní složkou elektrod při vybitém stavu je hydroxid kademnatý pro záporné elektrody a pro kladné hydroxid nikelnatý.[1][5] Nominální napětí jednoho článku se pohybuje okolo 1,2V, přičemž počet nabíjecích cyklů se pohybuje okolo 500, odvíjí se to od použité technologie. Podle konstrukce se odvíjí také hustota energie 45 Wh/kg.[1]

Tabulka 1.3 Základní charakteristické hodnoty pro NiCd akumulátory

Hustota energie [Wh/kg]	45
Počet cyklů [-]	500
Nominální napětí [V]	1,2
Teplotní pracovní rozsah [°C]	od -40 do + 70
Vybíjecí proud [násobky C]	až 10C [5]

Výhody a nevýhody

Výhody tvoří: možnost odebírání velmi vysokých proudů, rychlé nabíjení/vybíjení, odolnost vůči vibracím a rázům, široký teplotní rozsah práce od -40 °C do 70 °C a s tím spojená vysoká spolehlivost, široké možnosti využití, plochá křivka vybíjení – napětí zůstává při vybíjení v podstatě konstantní,[5] schopnost skladovat baterie ve vybitém stavu.[1]

Nevýhody, které provází tento akumulátor je jistě použití nebezpečného kadmia pro životní prostředí, paměťový efekt, nízká hustota energie, náhlý pokles napětí při vybíjení, vysoká hodnota samovybíjení.[5]

1.2.2 NiMH (nikl-metalhydridové)

Vývoj započal již v osmdesátých letech, kdy hlavním cílem bylo nahrazení nebezpečného kadmia pro životní prostředí.[5]

Co se týče aktivních hmot, které se podílí při vybíjení článků na tvorbě elektrické energie, tak jde o stejné složení jako u kladných elektrod nikl-kadmiových akumulátorů. Elektrolyt je zde tvořen stejně jako u NiCd akumulátorů hydroxidem draselným.[5] Rozdílné je použití elektrochemické aktivní složky u záporných elektrod, kde ji tvoří kovová slitina, spojená s použitím absorpce vodíku ve formě metalhydridu. Tato náhrada poskytla zvýšení elektrické kapacity baterie.[6]

Jeden článek NiMH je tvořen hlavními částmi jako je: katoda, anoda, separátor, elektrolyt a kokové pouzdro.

Nominální napětí jednoho článku se pohybuje okolo 1,2V.

Hojně se tyto akumulátory využívají v různém hobby nářadí, nahradili místa využívání NiCd akumulátorů, zdroje nepřerušitelného napájení (UPS), měřicí přístroje, nouzové osvětlení, mnoho dalšího až po využití v hybridních vozidlech.[6]

Výhody a nevýhody

Mezi výhody patří: větší kapacita oproti NiCd, nevyskytuje se paměťový efekt, malý vnitřní odpor, šetrnější k životnímu prostředí, vyšší hustota energie na kilogram, nemají oxidové vlastnosti.[5][6]

Mezi nevýhody se řadí: menší mechanická odolnost, větší hmotnost než NiCd a Li- ion, nevhodnost k rychlému nabíjení/vybíjení (spojeno s vyšší vnitřní impedancí)[5], vyšší cena než u NiCd, nemohou být skladovány ve vybitém stavu, horší odolnost proti chladu.[6]

Tabulka 1.4 Základní charakteristické parametry pro NiMH:

Hustota energie [Wh/kg]	70-100 [6]
Počet cyklů [-]	600[6]
Nominální napětí [V]	1,2[6]
Provozní teplota [°C]	Od -20 do +40 [6]
Vybíjecí proud [násobky C]	1C - 3C [7]

1.2.3 NiZn (nikl – zinkové)

Princip konstrukce těchto akumulátorů je dosti podobný jako u NiCd, pouze je místo kadmia použit u záporných elektrod zinek, zatímco u kladné elektrody je použit hydroxid niklu. Typicky bývají záporné elektrody složeny oxidem zinečnatý, který je navíc obohacen o různé přísady, jako může být uhlík, různé slitiny zinku, vodivé polymery a mnoho dalších. Jejich cílem je zvýšení antikoročních vlastností a vodivosti.[9] Elektrolyt je zde používán hydroxid draselný. Hustota energie se pohybuje od 70 do 110 Wh/kg.[8]

Výhody a nevýhody:

Mezi výhody se řadí: vyšší jmenovité napětí zhruba 1,7V, tolerance k přebíjení, zvládají hluboké vybíjení, nižší cena použitých materiálů.[8] Díky malému vnitřnímu odporu vynikají možnostmi rychlého vybíjení, schopnost rychlého nabíjení, nepředstavují hrozbu k životnímu prostředí, nehořlavé, snadná recyklace niklu a zinku.[9]

Nevýhody: při vybíjení dochází k vzniku meziproduktů, které nám způsobují snížení životnosti okolo 200 cyklů do 80% kapacity.[8]

1.3 Li-ion akumulátory

Dobíjecí lithium iontové baterie se stejně jako jakákoliv jiná baterie skládají z více oddílů generujících energii, známých jako články. Tyto články se skládají z několika částí, jak můžeme vyzorovat z obrázku 1.2 Kladné elektrody připojené ke kladnému pólu, záporné elektrody připojené k zápornému pólu a elektrolyt mezi nimi. Elektrolyt bývá bez vodný, který může být ve formě kapalné, gelové nebo polymerové. V komerčních Li- ion bateriích se jedná typicky o kapalný elektrolyt roztoku solí lithia v organických rozpouštědlech. [10]

Elektrody jsou odděleny separátory, typicky to bývá mikroporézní polymerní membrána, která umožňuje výměnu iontů, ale neumožňuje výměnu elektronů. [10]

Lithium iontové baterie fungují všechny podobným způsobem. Během procesu nabíjení jsou dvě elektrody připojeny externě k elektrickému zdroji. Elektrony jsou nuceny se uvolnit na katodě a přesunout se k anodě. Současně se ionty lithia pohybují ve

stejném směru, ale uvnitř od katody k anodě prostřednictvím elektrolytu. Tímto způsobem je energie elektrochemicky uložena v baterii ve formě chemické energie v anodových a katodových materiálech s různými chemickými potenciály.[12]

Opak nastává během procesu vybíjení, elektrony se pohybují od anody ke katodě přes vnější zátěž, aby vykonaly práci a ionty lithia se pohybují od anody ke katodě v elektrolytu. Elektrony neprocházejí elektrolytem.[12]

Výhody a nevýhody

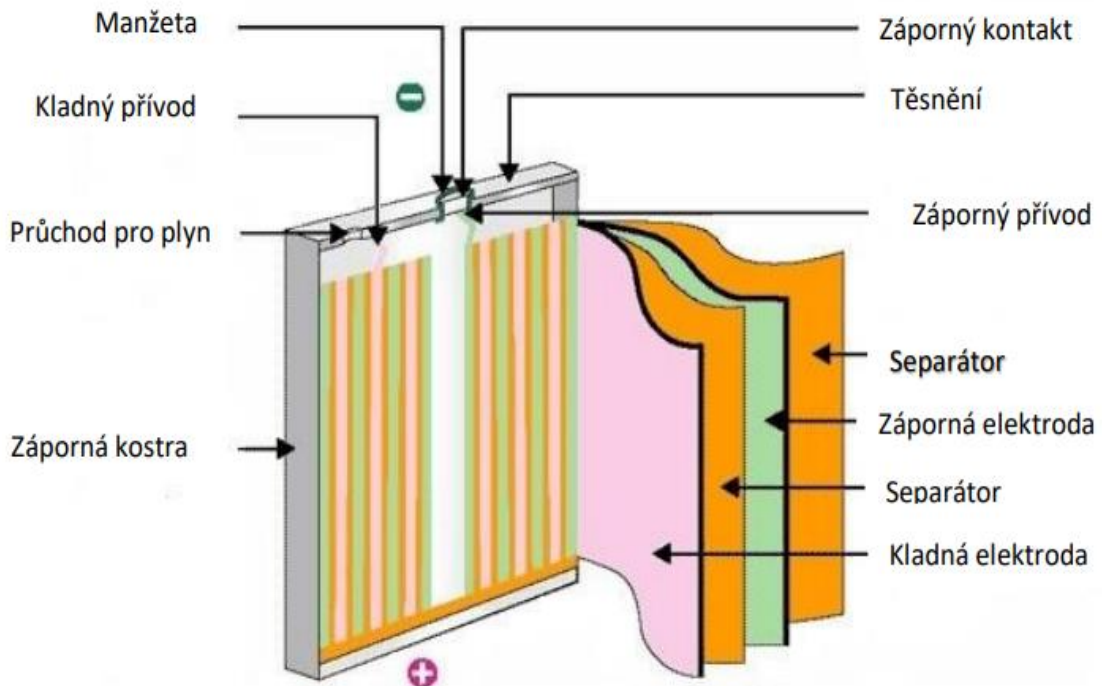
Výhody:

- různé dostupné typy – jsou k dispozici v různých tvarech a velikostech
- není nutné doplňovat elektrolyt,
- malá údržba,
- dlouhá životnost – po 500 cyklech ztratí některé baterie 20 % své původní kapacity, zatímco dnešní moderní si udrží kapacitu po 2000 cyklech,
- vysoké napětí naprázdno,
- rychlé nabíjení oproti ostatním typům,
- nízké samovybíjení – 1,5-3 % za měsíc, ve srovnání s nikl-metal hydridovými (okolo 20 % za měsíc),
- malé a lehké,
- neprojevuje se u nich paměťový efekt,
- vysoká hustota energie.[10]

Nevýhody:

- citlivost na vysokou teplotu,
- bezpečnost – přehřátím, přetížením dochází k produkci plynu spojenou s rozpadem elektrolytu, a tak dochází ke zvýšení tlaku článku. Hrozí zapálení elektrolytu a způsobení požáru,
- hluboké vybíjení – při hlubokém vybití článku pod určitou úroveň dojde k jeho nefunkčnosti,
- efekt stárnutí,
- potřebná ochrana proti přebíjení a vybíjení.[10]

Níže je zobrazena základní konstrukce li-ion akumulátoru.



Obrázek 1.2 Struktura li-ion akumulátoru [11]

Jednotlivé lithium-iontové akumulátory můžeme rozdělit podle používaných materiálu, ze kterých bývají složeny elektrody. U kladných elektrod to bývá například: kobalt, nikl, mangan, titan nebo železo – fosfát. Můžeme je také dělit podle uhlíkového materiálu použitého pro zápornou elektrodu. Představení hlavních šesti používaných typů:

1.3.1 lithium-železofosfát LiFePO_4 (LFP)

V současné době je jednou z nejrozšířenějších využívaných baterií. Je také známa pod zkratkou (LFP). Katodový materiál je zde použit fosfát a anadou je zde grafická uhlíková elektroda. [13]

Primární výhodou těchto baterií je jejich odolnost, dlouhá životnost, díky nízkému odporu jsou velmi stabilní a jedny z nejbezpečnějších li-ion baterií. Hodí se pro aplikace, které potřebují velké množství energie. [13]

Mají také několik nevýhod, a to je poměrně relativně nízká specifická energie, výkon může trpět i při nízkých teplotách, nemusí být vhodné pro aplikace s vysokými otáčkami.[13]

Základní parametry: Tyto bateriové články disponují jmenovitým napětím 3,2V, měrná energie 90 - 120Wh/kg, životnost dosahuje 2000 cyklů a více, vybíjecí proud se pohybuje okolo 1 C. [14]

1.3.2 Lithium kobalt – LiCoO₂ (LCO)

Nejvíce se tyto baterie využívají v menší přenosné elektronice, jako jsou tablety, notebooky, fotoaparáty a mobilní telefony. Již se uvažuje o zmenšení jejich užívání v důsledky vysokých nákladů na kobalt a bezpečnosti. Tyto baterie disponují vysokou specifickou energií, ale mají nízký specifický výkon. Katoda se skládá z oxidu kobaltu a anoda z uhlíkového grafitu. Hodí se na dodávání energie po delší dobu, ale nehodí se k vysokým zatížením. [13]

Mají některé významné nevýhody jako je kratší životnost, náklady na kobalt, nízká tepelná stabilita, což vede k obavám z bezpečnosti. [13]

Základní parametry: Jmenovité napětí je 3,6V, měrná energie se pohybuje mezi 150- 200Wh/kg, u některých dosahuje až 240 Wh/kg, vybíjecí proud 1 C, životnost cyklů se pohybuje mezi 500-1000 cyklů.[14]

1.3.3 Lithium manganový (LMO)

Používá se zde jako katodový materiál oxid lithný a manganatý, tím je vytvořena trojrozměrná struktura, která zlepšuje tok iontů. Díky tomu je snížen vnitřní odpor a jsou zlepšeny vlastnosti tepelné stability a bezpečnosti. [13]

Využívají se v ručních elektrických nástrojích, lékařských pomůckách nebo v hybridních a elektrických vozidlech. [13]

Výhody: vysoký specifický výkon z toho důvodu dokážou dodávat větší proud než LCO, disponuje také lepší tepelnou stabilitou, což znamená, že bezpečně zvládají také vyšší teploty. [13]

Hlavní nevýhodou je krátká životnost 300-700 nabíjecích cyklů. [13]

Základní parametry: Jmenovité napětí 3,7V, měrná energie se pohybuje 100- 150Wh/kg, vybíjecí proud 1 C. [14]

1.3.4 Lithium nikl mangan kobalt (NMC)

Kombinují se zde tři hlavní prvky v katodě jako je nikl, mangan a kobalt, zatímco anoda je složena z grafitu. Kombinací těchto tří prvků dochází k získání stabilní chemie a vysoké specifické energie. [13]

Využívají se v elektrickém nářadí, v elektrických skútrech a v různých elektrických vozidlech. [13]

Nevýhodou může být nižší jmenovité napětí než u baterií na bázi kobaltu. [13]

Základní parametry: Jmenovité napětí je 3,6V, životnost se pohybuje okolo 1000- 2000 cyklů, vybíjecí proud 1-2 C, přičemž kapacita může dosahovat hodnot až 150-220 Wh/kg. [14]

1.3.5 Lithium nikl kobalt aluminium – LiNiCoAlO₂ (NCA)

Tento typ je hojně využíván v elektrických vozidlech, díky schopnosti zvládat vysoké zatížení a jeho dlouhé životnosti.[12]

Velkou výhodou těchto baterií je jejich vysoká hustota energie se slušným specifickým výkonem, díky tomu dokážou dodávat velké množství proudu po delší dobu.[13]

Nevýhodou jsou větší problémy s bezpečností oproti ostatním technologiím a také jejich vysoká cena. [13]

Základní parametry: Jmenovité napětí je 3,6V, vysoká měrná energie, která se pohybuje mezi 200- 260Wh/kg, vybíjecí proud 1 C, životnost dosahuje 500 cyklů.[14]

1.3.6 Lithium-titan (Li_2TiO_3) LTO

Největším rozdílem těchto akumulátorů je nahrazení grafitu v anodě lithiium titanátem. Katoda bývá stejného složení jako LMO nebo NMC. [13]

Uplatňují se v elektromobilech, nabíjecích stanicích, uložistiích solární a větrné energie, telekomunikačních systémech nebo také v leteckém vybavení. [13]

Řadí se mezi extrémně bezpečné, mají širokou provozní teplotu, také disponují dlouhou životností, nabízí také možnost rychlého nabíjení. [13]

Praktickou nevýhodou je nízká hustota energie a vysoká cena. [13]

Základní informace: Nižší jmenovité napětí 2,4V. Velice dobrá životnost 3000-7000 cyklů. Nižší měrná energie 50 - 80Wh/kg. Velký vybíjecí proud až 10 C.[14]

Tabulka 1.5 Stručné porovnání typů li-ion akumulátorů

Typ	LFP	LCO	LMO	NMC	NCA	LTO
Jmenovité napětí [V]	3,2	3,6	3,7	3,6	3,6	2,4
Počet cyklů [-]	2000+	500-1000	300-700	1000-2000	500	3000-7000
Hustota energie [Wh/kg]	90-120	240	100-150	150-220	200-260	50-80
vybíjecí proud [násobky C]	1	1	1	1-2	1	10

1.4 Lithium-polymer

Polymerní lithiová baterie pracuje na velmi podobném principu jako fungují lithiium iontové baterie. Hlavní rozdíl spočívá v tom, že se elektrolyt liší od elektrolytu tekutého lithia. Struktura baterie je tvořena třemi hlavními částmi: kladnou elektrodou, zápornou elektrodou a elektrolytem. Takzvaná lithiium polymerová baterie se rozlišuje použitím polymerního materiálu alespoň v jedné části ze tří hlavních částí struktury bateriového systému. Zpravidla bývá použit v kladných elektrodách a v elektrolytu.[15]

Jako materiály kladné elektrody bývají využívány vodivé polymery nebo anorganické sloučeniny používané obecně v lithium-iontových bateriích. Narozdíl u záporné elektrody je časté použití sloučenin lithium-kov nebo lithium – uhlík. Elektrolyt nejčastěji obsahuje pevné, popřípadě koloidní polymerní elektrolyty nebo na organické bázi.[15]

Specifické využití těchto akumulátorů našlo své místo ve výrobcích a zařízeních, kde je hmotnost důležitým prvkem, z tohoto důvodu bývají hojně využívány v menších zařízeních jako jsou například mobilní telefony.[17]

Výhody: nízká hmotnost, samovybití okolo 5 % za měsíc.[17]

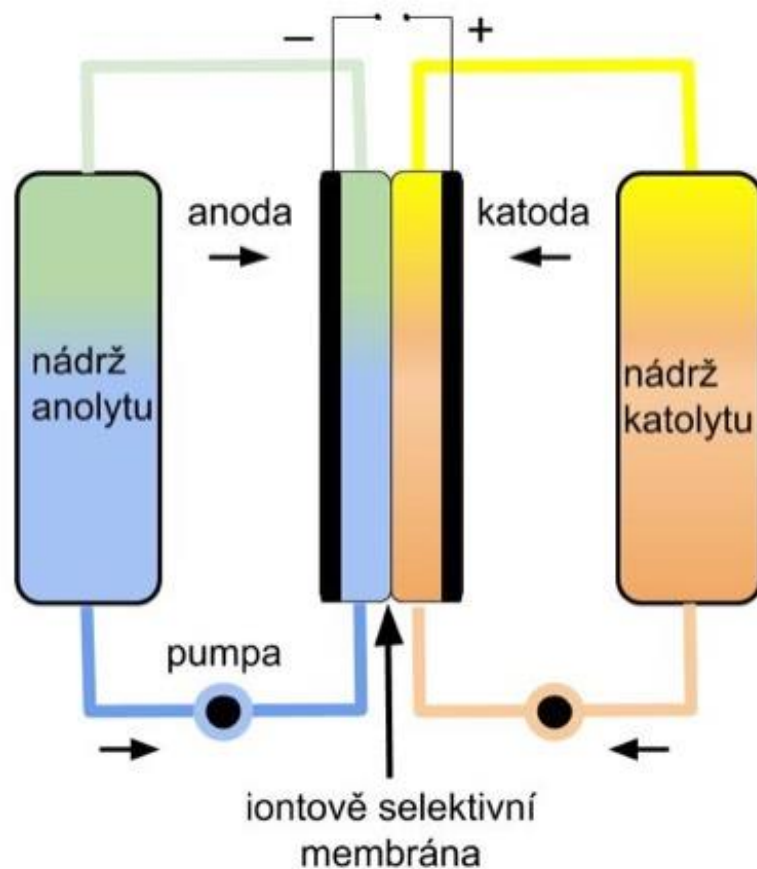
Nevýhody: celková životnost při menším namáhání je 500-800 cyklů, zejména při použití s vysokými nároky je životnost ještě nižší např. u vysoko vybíjecích baterií je to pouze okolo 250-500 cyklů. Další nevýhodou může být jejich cena oproti NiCd a NiMH nebo vůči lithium iontovým. Bezpečnostní problémy spojené s přepravou těchto baterií. Pokud nedochází k správnému užívání, díky vyššímu vnitřnímu odporu, se kterým se pojí vyšší množství generovaného tepla, tak zde v krajních případech hrozí požár až výbuch akumulátoru.[17]

Základní parametry: jmenovité provozní napětí je 3,7V, vybíjecí proud dosahuje velikosti 1 C, dosáhnout životnosti více jak 500 cyklů, teplotní provozní rozsah se pohybuje mezi -20 °C –až +60°C. [16]

1.5 Průtokové baterie

Hlavním rozdílem průtokových baterií oproti typům dobíjecích baterií spočívá v uložení vodného roztoku elektrolytu, kdy se tento roztok nenachází v prostoru okolo kladné a záporné elektrody.[18]

Dle konstrukce průtokové baterií zobrazené na obrázku 1.3 vyplývá, že se aktivní materiál skladuje ve dvou vnějších nádržích, ve kterých je uložen jako anodový a katodový elektrolyt, který je vháněn pomocí čerpadel při tvorbě elektrického proudu do prostoru cely. Ta se nachází mezi elektrodami, a navíc je rozdělena na dvě části pomocí iontoměničové membrány. Ta zabraňuje promíchání elektrolytů a umožňuje výměnu iontů mezi anodovým a katodovým prostorem. Uvolněné elektrony při oxidaci odebírá během provozu anoda a katoda pak tyto přenesené elektrony daruje redukčnímu ději. Po tomto ději putuje vyčerpaný elektrolyt zpět do nádrží a čeká až dojde k opačnému procesu.[19]



Obrázek 1.3 Konstrukce průtokové baterie [19]

Většina komerčně dostupných průtokových baterií používá kapalný elektrolyt vanadu. Na bázi takového složení elektrolytu pracuje první typ průtokové baterie známé jako vanadium redoxní baterie. Máme také typ hybridní, kdy je alespoň jeden z reaktantů v pevném skupenství, což bývá typické složení zinek-brom. Pevnou část zde zastupuje zinková anoda. Při vybíjení dochází k jejímu rozpouštění v elektrolytu, čímž se přímo účastní reakce. Dále mohou být využity aplikace na bázi železo-chrom, zinek-železo, polysulfid-brom, vanad-vanad a železo-železo. [19]

Díky rozdělení elektrolytu na anolyt a katolyt nedochází k degračním procesům v elektrolytu. To přináší určité zajímavé výhody v provozu, kdy je možné v podstatě získat neomezený počet cyklů nabití a vybití. Je možné je také ponechat delší dobu ve vybitém stavu a nedojde k způsobení poškození baterie. Tyto bateriové systémy se navíc řadí mezi bezpečné, díky využití nehořlavých elektrolytů. [18]

Dochází k odhadům, že životnost baterie se může pohybovat mezi 30-50 lety s počtem cyklů v řádech tisíců až deseti tisíců. Nejmenší životnost z uvedeného bateriového systému má iontoměničová membrána a to okolo 15000 cyklů. Životnost iontoměničové membrány netvoří žádnou problematickou část, která by ovlivnila chod systému, jelikož není technický problém s její výměnou. [18]

Nevýhodou průtokových baterií je jejich poměrně nízká hustota energie 15 až 25 kWh/m³ v porovnání s lithiem iontovými, které mají zhruba 300 kWh/m³. Navíc se s tímto faktem pojí náročnost na prostor, který by byl potřebný, pokud by byla tendence využít tvorbu uložistiště na bázi průtokové baterie. Mezi nevýhody spadá také složitost čerpacích mechanismů.[18]

Vlivem dostupnosti jsou tyto baterie nabízeny k zálohování energie do elektrické sítě. Hodí se k především velkoobjemovému ukládání energie, takže je jejich aplikace spíše možná v místech, které disponují dostatečným prostorem.[19] Tyto baterie mohou být využity například k vyrovnání krátkodobých, střednědobých výkyvů fotovoltaických a větrných elektráren. Z důvodu minimálních provozních nákladů a zanedbatelné hodnotě samovybíjení lze zařízení využívat jako spolehlivý záložní zdroj, kde došlo k zabezpečení napájení např. nemocnice, letiště. [18]

1.6 Baterie Sodium-Sulfur (NaS)

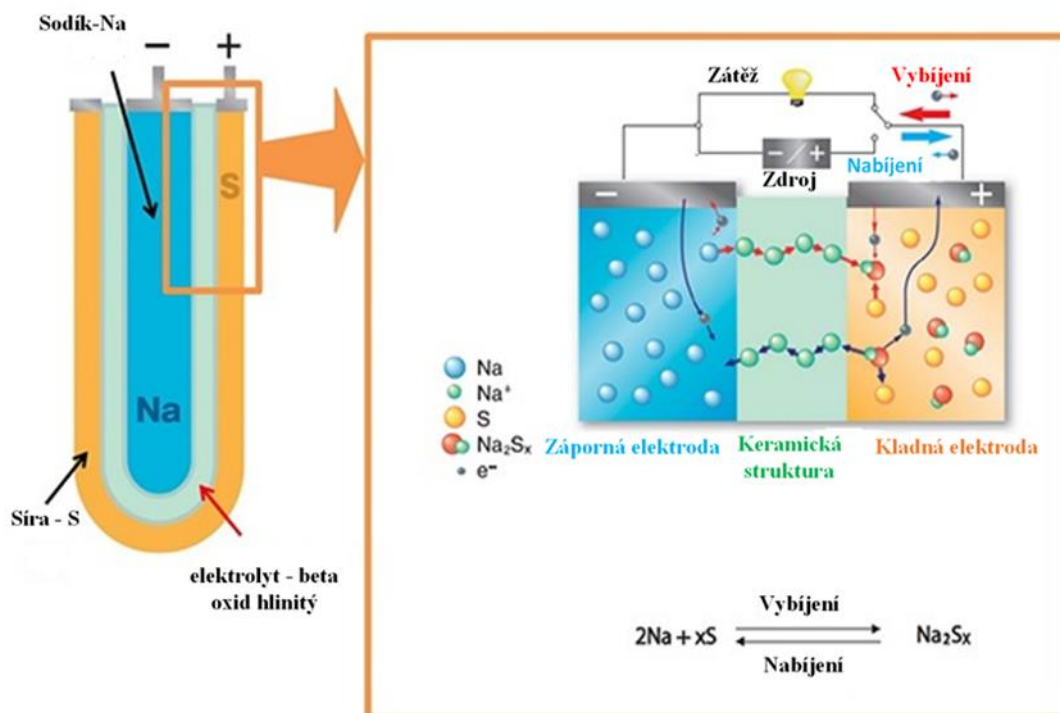
Bateriový systém je založen na systému skladování energie na bázi elektrochemické reakce, ve které dochází k ní dochází mezi kladnou elektrodou (katodou), která je typicky vyrobena z roztavené síry a elektrodou zápornou (anoda), která od ní narozdíl vyrobena z roztaveného sodíku. Elektrody jsou odděleny keramickou vrstvou. Jedná se specificky o beta oxid hlinitý, který navíc slouží jako elektrolyt. Tato vrstva umožňuje průchod kladně nabitým iontům sodíku [21], jak je zobrazeno v obrázku 1.4, kde je navíc zobrazen celý proces nabíjení a vybíjení.

Teplota baterie se musí udržovat mezi 300 až 350 °C, aby se udržely elektrody v roztaveném stavu, díky čemuž jsou nedílnou součástí bateriového systému nezávislá topidla.[21]

Vzhledem k provozní teplotě a vysoce korozivního polysulfidu sodného jsou vhodné především pro rozsáhle nemobilní aplikace, jako může být ukládání elektrické energie z nadprodukce výroby pomocí větrných a solárních elektráren. Hustota energie dosahuje 100-120 Wh/kg s účinností 75-85 %. Tato energie by poté mohla být dodávána do sítě v případě energetických špiček. Díky tomuto ukládání energie by došlo navíc ke stabilizaci těchto elektráren, kdy by mohla být energie využívána v časech, kdy produkce z těchto elektráren je minimálně nebo dokonce žádná. Životnost se pohybuje okolo 15let/4500 cyklů. [21]

Velkou výhodou těchto baterií je, že nepodléhají samovybíjení oproti ostatním typům jako jsou například olověné, NiCd nebo varianty Li-ion. [23]

Mezi nevýhody spadají provozní podmínky, které vyžadují zdroj tepla, s tím je spojeno snížení účinnosti baterie, protože zdroj tepla potřebný pro další provoz je udržován pomocí vlastní akumulované energie. Díky tomu je baterie víceméně nepohyblivá a nepraktická pro domácí použití.[23]



Obrázek 1.4 Schéma baterie NaS s principem nabíjení/vybijení [22]

2. SUPERKONDENZÁTORY

Druhým nejvíce rozšířeným způsobem ukládání energie je ukládání energie pomocí kondenzátorů. Ty ukládají energii na elektrostatickém principu ve srovnání s akumulátory, které pracují na chemické bázi. Jako takovou alternativou mezi těmito dvěma typy se jeví superkondenzátory.

2.1 Struktura a princip funkce

Superkondenzátor (neboli ultrakondenzátor) se liší od kondenzátoru dvěma důležitými způsoby: jeho desky mají efektivně mnohem větší plochu a vzdálenost mezi nimi je mnohem menší, protože separátor mezi nimi funguje jiným způsobem než konvenční dielektrikum. Stejně jako běžný kondenzátor má superkondenzátor dvě desky, které jsou odděleny separátory.[24]



Obrázek 2.1 Struktura superkondenzátoru [26]

Desky-elektrody superkondenzátoru jsou vyrobeny z kovu potaženého porézní látkou, jako je práškové aktivní uhlí, což velmi efektivně poskytuje větší plochu pro uložení mnohem většího náboje. Dalo by se zjednodušeně říct, že tyto porézní desky tvoří takovou houbu na náboje. Snaha je tedy zvětšit efektivní plochu desek a zmenšit vzdálenost mezi deskami za cílem zvětšení kapacity.[24]

V běžném kondenzátoru jsou desky odděleny relativně silným dielektrikem vyrobeným z něčeho jako slída (keramika), tenké plastové fólie nebo dokonce jednoduše je použit jako dielektrikum vzduch.[24]

V superkondenzátoru neexistuje žádné dielektrikum jako takové. Místo toho jsou obě desky namočené v elektrolytu a odděleny velmi tenkým izolátorem, který může být

vyroben z uhlíku, papíru nebo plastu. Když se desky nabíjí, na obou stranách separátoru se vytvoří opačný náboj (viz. obrázek 2.1), který vytvoří to, co se nazývá elektrická dvouvrstva. možná jen jedna molekula tlustá ve srovnání s dielektrikem, které se může pohybovat v tloušťce od několika mikro do milimetru nebo více v konvenčním kondenzátoru. To je důvod, proč jsou superkondenzátory často označovány jako dvouvrstvé kondenzátory, nazývané také elektrické dvouvrstvé kondenzátory. [24]

V nenabitém stavu jsou náboje (ionty) rovnoměrně rozloženy v elektrolytu. Po přiložení napětí na elektrody dochází k přesunu záporných iontů ke kladné elektrodě, a naopak kladné ionty se přesouvají k elektrodě záporné. Následně vznikne na stranách separátorů zmíněná elektrická dvouvrstva. [26]

2.2 Použití superkondenzátoru

Využívají se v situacích, kdy je požadováno opětovné ukládání a odběr elektrické energie v menším množství na jednotku hmotnosti než u lithium iontových baterií. Konkrétní využití našli u hybridních autobusů, kde při elektrodynamickém brzdění ukládají energii. Hojně jsou využívána společností Škoda Electric a.s, jenž díky nim zavedla výrobu tramvají, které umožňují akumulovat energii při brzdění.[25] Jedna z běžných aplikací je ve větrných turbínách, kde velmi velké superkondenzátory pomáhají vyhladit přerušovanou energii dodávanou větrem. Rozšiřuje se jejich uplatnění v hybridních vozidlech jako dočasné zásobníky energie pro regenerativní brzdění.[24]

Výhody:

Velkou výhodou superkondenzátoru je, že dokáže ukládat a uvolňovat energii téměř okamžitě ve srovnání s bateriemi na základu chemických reakcí. Má vyšší hustotu výkonu. [24] Vydrží obrovské množství cyklů nabití/vybití. Velmi krátká možná doba pro nabití.[27] Vysoká účinnost až 95 %. [26]

Nevýhody:

Mezi nevýhody se bezpochybně řadí jejich nízká energetická hustota a jejich hodnota poměrně vysoká hodnota samovybití.[27] Kolísání napětí v závislosti na množství uložené energie – vybíjecí křivka.

Tabulka 2.1 Parametry superkondenzátoru [27]

Jmenovité napětí [V]	2,3-2,75
Počet cyklů [-]	až 1000 000
Hustota energie [Wh/kg]	5
Provozní teplota [°C]	-40 až 65
Samovybití (30dní)	Vysoké 5-40 %
Specifický výkon [W/kg]	až 10 000
Nabíjecí čas [s]	1-10

3. SECOND LIFE

V současné době dochází k velkému nárůstu využívání akumulátorů v řadě odvětvích. Dnes je možné se s nimi setkat prakticky všude, jako jsou mobilní telefony, notebooky, elektrokoloběžky, elektrické motocykly a mnoho dalších. Můžeme zaznamenat obrovský rozvoj v rámci dopravy, kdy je kladen důraz na nutné snížení uhlíkové stopy. S tím se pojí velký rozmach a podpora elektromobility, a to znamená další nárůst množství akumulátorů. Dochází ke kladení otázek, co je možné s takovým množstvím akumulátorů udělat, když doslouží.

Ať se samotnou baterií nakládáme jakkoliv, časem se tato baterie stejně dostane ke konci svého životního cyklu, kdy přejdeme ke stejně nutné recyklaci, popřípadě z důvodu obrovského množství vyřazených baterií jich také končí mnoho na skládkách bez jakékoliv recyklace.

Se samotnou recyklací se pojí hned několik problémů. Baterie jako takové jsou svojí konstrukcí velmi složité, z toho důvodu je tak náročná jejich demontáž. Mechanické rozebírání sériově propojených článků je tak náročné, že recyklace probíhala nejčastěji v tavicí peci za pomoci pyrometalurgické metody. Ta je samo o sobě málo účinná, takže z ekonomického a materiálová hlediska se více vyplatilo těžit suroviny a vyrábět baterie nové, přičemž vznikají různé další pilotní projekty na recyklaci baterií. Další problém je spojen s tím, že lithiové baterie obsahují pouze 2–7 % samotného lithia z celkové jejich hmotnosti a jeho získání prostřednictvím recyklace je pětikrát dražší než získání nového lithia z přírodního zdroje. V podstatě jediným materiálem, který stojí za to recyklovat je prozatím kobalt, přičemž je snaha o jeho nahrazení stabilnějšími a levnějšími látkami.[28]

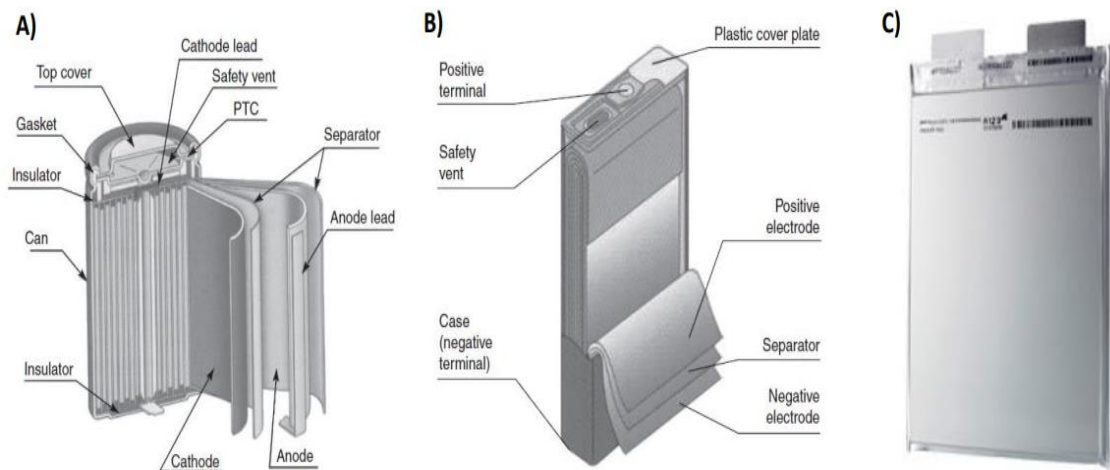
Se zajímavým řešením před samotnou recyklací přichází možnost využití baterií v režimu second life. Second life pojednává o bateriích druhé životnosti, které lze použít pro různé využití poté, co skončí jejich počáteční životní cyklus, kdy v podstatě skončí jejich možná aplikace na původním místě. Tyto baterie ale stále disponují zbytkovou kapacitou, která může být u automobilů až 80 %. To znamená, že mohou být využity různými, ale stále účinnými způsoby, které mohou přinést zajímavé ekonomické výhody. Vývoj životaschopných baterií druhé životnosti a bateriových sad může snížit množství odpadu a také zabránit dodatečnému vyčerpání nerostů na planetě. Prodloužení životnosti baterií znamená snížení jejich uhlíkové stopy. [34]

3.1 Proces repasování baterií

Samotný proces přípravy použití baterií pro další aplikaci v režimu second life má několik částí, kterými musí samotné jednotlivé bateriové články projít, aby mohly být využité k další aplikaci. Při zaměření se na zbytkovou kapacitu u bateriových článků např. z elektrických vozidel, tak po dosažení přibližně kapacity 80 % končí jejich první cyklus života. Po jejím dosažení se přechází k otázce repasování těchto baterií. Samotný proces

reparování se neobejde bez přirozených komplikací. Hlavním problémem s renovací starých baterií je nedostatek univerzálních článků. Každý výrobce článků využívá rozdílný typ článků, který vyžaduje jedinečný typ modulu. Tyto moduly se vzájemně vylučují z hlediska kompatibility. [28]

V první fázi vytvoření systému skladování energie je nutné provést demontáž použitých baterií. V hlavních zdrojích baterií druhé životnosti, jakou jsou elektromobily se jednotlivé bateriové sady skládají z mnoha článků, a proto je demontáž klíčovým krokem k výrobě bateriových systémů druhé životnosti. Vzhledem k tomu, že různí výrobci používají různé typy článků, které mají odlišné vlastnosti, lze demontované součásti na základě toho rozdělit do kategorií pro snadnější výběr pro další použití. Dají se rozdělit na prizmatické články, válcové a váčkové = pouch.[28] Jak lze vidět na obrázku níže 3.1.



Obrázek 3.1 Typy článků: A) Cylindrické, B) Prismatická, C) Pouch[29]

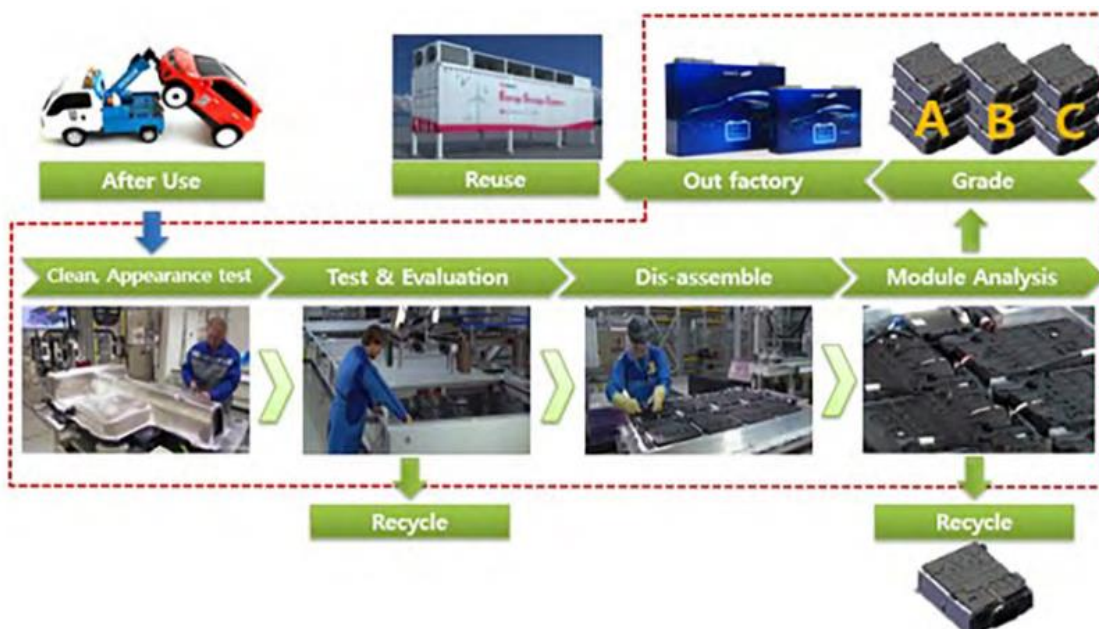
Samotná demontáž musí být prováděna v kontrolovaném prostředí bez přístupu vzduchu, aby došlo k zabránění oxidace na katodách. Při této fázi se provádí také odstranění rozhraní pevného elektrolytu, což je vzniklá pasivační vrstva, která se vytvoří v důsledku produktů vzniklých rozkladem elektrolytu na rozhraní elektrody a elektrolytu. Zpravidla se to prozatím provádí u typů LiFeO₄. Toto odstranění je prováděno pomocí laserové techniky. Aktuálně se provádí průzkum možnosti aplikace i u dalších typů akumulátoru, jelikož se může po odstanění této vrstvy značně obnovit výkon baterie. [28]

Akumulátorové články získané po demontáži použitých baterií z elektromobilů je třeba otestovat, aby bylo možné určit jejich vhodnost pro možné další využití v režimu second life. Provede se otestování stavu článku z hlediska napětí, kapacity, výkonu, stavu SOH a díky tomu se provede homogenní výběr článků pro každou sadu baterií druhé životnosti. V podstatě se to provádí třístupňovým hodnotícím výběrem. V prvním stupni se provede vizuální kontrola, která by odhalila články, moduly se zjevným fyzickým poškozením. Poškozené jsou automaticky vyřazeny a putují do recyklačního procesu, nebo jsou skládkovány. V druhé fázi se provede ověření napětí baterií. Pokud jsou

vyhodnoceny jako vhodné, tak jsou podrobeny posouzení SOH. Ty, které se ukázaly v druhé části vhodné k dalšímu použití jsou vystaveny cyklickému testování, kdy se v předem daných laboratorních cyklech zkoumá jejich kapacita, napětí, zdravotnost článku, fyzikální vlastnosti a další parametry (parametry krátké impedance, pulzní výkon). V této fázi se také provádí testování baterií v závislosti na výkonosti zatížení. Při podrobení článků vysoce výkonným cyklům dochází ke snížení jejich kapacity a účinnosti. Na druhou stranu cyklus s nízkým výkonem nejevil žádné patrné deformace. [28]

Zbývající kapacita se ukazuje jako rozhodující faktor k druhotnému využití. Odhad zbývající kapacity je pořád takovým předmětem arbitráže. Různí výzkumníci k této problematice přistupují jinak. Jednou z možných metod je využití předpokladu, kdy si stanoví celkovou délku životnosti baterie a následně dojde k odečtení doby první životnosti. Existují i jiné pozoruhodné práce, které nevycházejí z pevně daných parametrů, ale vycházejí při odhadu z dat o používání akumulátorů. [28]

U článků druhé životnosti je možné zaznamenat nárůst vnitřního odporu, kde se často vnitřní odpor změní až o více jak 100 %, což následně zapříčiní zrychlené stárnutí a zvýšení degradace. Zvýšení vnitřního odporu se liší u každého článku v závislosti na jeho původním využívání. U článků, u kterých bylo naměřeno zvýšení vnitřního odporu o 360 %, tak tyto akumulátory se již zpravidla nevyužívají v režimu second life. Nevyužívají se rovněž také baterie, které dosáhly stárnoucího kolene. Zde dochází k nevratnosti změny dominantního mechanismu stárnutí, a to i za mírných provozních podmínek. Při testování se prokázalo zrychlení procesu degradace při vystavení článku vyšší teplotě.[30]



Obrázek 3.2 Zjednodušené schéma procesu zpracování baterií [31]

3.2 Bateriový systém skladování energie

Baterie, u nichž bylo zjištěno, že jsou vhodné pro použití v second life. Dojde následně k jejich použití k výrobě systémů skladování energie (BESS). Jednotlivé součásti těchto systémů v rámci second life jsou podobné obecnému systému ukládání energie, pouze je rozdíl v tom, že se zde používají baterie, které již předtím byly využívány pro jiné aplikace. Obecně se systém skládá z bateriových sad, přidružených napájecích zdrojů, elektronických systémů včetně systému řízení baterie (BMS). Systém BMS zde musí provádět kromě běžné funkce systému BMS také úkol důslednějšího dohledu na vyvažování baterií, protože se očekává, že baterie v režimu second life budou mírně nestabilnější i po důkladném testování a klasifikaci v rámci jednotlivých fází. [28] Důkladnější dohled se pojí také s teplotou článků, jelikož bude možné u nich zaznamenat zvýšené oteplení, což by následně zapříčinilo urychlení degradace.

3.2.1 Základní topologie stacionárního bateriového úložného systému

Bateriový systém se skládá z několika bateriových sad a více baterií vzájemně propojených tak, aby bylo dosaženo cílové hodnoty proudu a napětí. Zatímco sériovým zapojením článků dochází k součtu jejich napětí, tak při paralelním zapojení článků se zvýší využitelná kapacita. Kombinací propojení jednotlivých článků vzniká bateriový modul. Poté lze následným propojením jednotlivých modulů seriově–paralelní konfigurací získat systém o námi požadované kapacitě a velikosti úložné energie.[32] Tyto moduly jsou poté naskládány a spojeny do bateriového stojanu. Bateriové stojany následně slouží k vytvoření velkého, vysoce výkonného BESS. Taková uložiska o větší možné kapacitě bývají zpravidla uložena v lodních kontejnerech, jak je možné vidět na obrázku 3.3.

Celý systém se skládá z více komponentů a systémů, které dohlíží na jeho bezpečný provoz.

Prvním takovým systémem je „System Control and Monitoring“, což je IT systém, který se věnuje řízení a získávání dat z celého systému., přičemž je do něj možné zahrnout také jednotky požární ochrany nebo poplachu. Jeho součástí je také systém EMS.[32] Energy management system má na starosti komunikaci přímo s PCS a BMS. Je zodpovědný za tok/řízení/distribuci energie v systému. Věnuje se zjednodušeně optimalizaci výkonu, kdy dokáže reagovat na špičkové požadované hodnoty zátěže nebo vlastní spotřeby.[33]

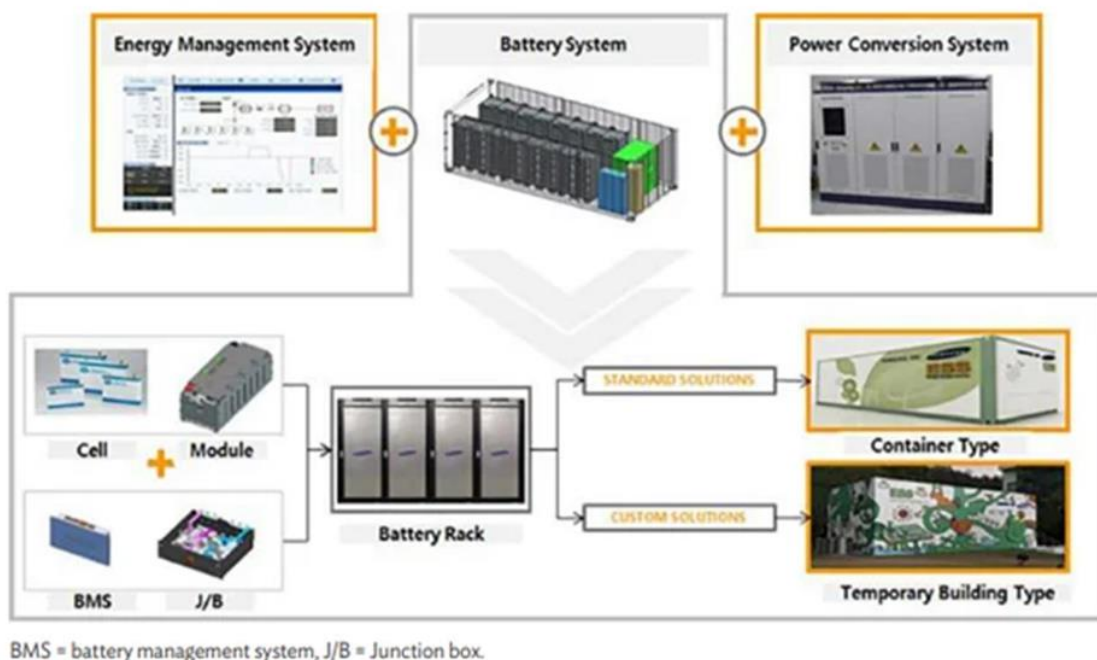
Systému řízení teploty, který řídí všechny funkce související s vytápěním, větráním a klimatizací kontejneru systému. Díky správnému udržování meze teploty a proudění vzduchu v BESS se nezvyšuje pouze bezpečnost celého systému, ale také se prodlužuje životnost samotných baterií.[32] Bez správného řízení teploty by došlo k přehřívání článků, což by vedlo k degradaci, nesprávné funkci nebo dokonce k tepelnému úniku.[33]

Systému řízení baterií (BMS) řídí správnou činnost jednotlivých článků, aby byl systém ochráněn před škodlivým provozem, pokud jde o napětí, proud a teplotu. Díky

systemu BMS je dosaženo spolehlivého a bezpečného provozu a předejde se tak poškození. BMS také dohlíží na vyrovnávací stav nabití (SOC) a stav zdraví (SOH) jednotlivých propojených článků. [34] Systém BMS umožňuje monitorování a ochranu baterií v reálném čase nejen na úrovni článků, ale i na úrovni modulu, řetězce a systému. Neustále monitoruje stav baterie a pomocí algoritmů specifických pro aplikaci analyzuje data, řídí prostředí baterie a vyvažuje ji. Samotná systém je nedílnou součástí bateriového uložení z důvodu zajištění bezpečnosti a dlouhé životnosti baterie.[33]

Systém baterií je připojen ke střídačům, které transformují stejnosměrný proud (DC) na střídavý proud (AC). V každém BESS je specifická úroveň výkonové elektroniky nazývaná PCS (power conversion system), obvykle seskupená v konverzní jednotce, včetně všech pomocných služeb potřebných pro správné monitorování.[34] Samotný systém BESS uchovává a dodává elektrinu jako stejnosměrný proud (DC) a většina elektrických systému a zátěží pracuje na střídavý proud (AC). Kvůli tomu je potřeba PCS. Tato zařízení dokáží převádět energii obousměrně, což dává uložení schopnost se nabíjet a vybíjet. Systém musí mít přístup ke stavu SOC, aby dokázal rozlišit, kdy má docházet k nabíjení a kdy má baterie přestat vybíjet. Bývá řízen nadřazenými funkcemi, jako je třeba systém EMS.[33]

Transformátor je volitelný a lze jej vynechat v případě shody napěťových úrovní výstupu systému a připojení k síti. Transformátory se při potřebě volí k provádění konverze napětí mezi napěťovou hladinou uložení a danou napěťovou hladinou sítě. [32]



Obrázek 3.3 Architektura bateriového systému skladování energie [34]

3.3 Možnosti použití

Mohou být použity ve stacionárních systémech v kombinaci s obnovitelnými zdroji energie, jako je větrná a solární energie. Již byly zkonstruovány různé projekty, jeden z nich je například projekt PIONEER, kde jde o uložště o výkonu 10MWh, které je právě ve spojení se solární fotovoltaickou elektrárnou o výkonu 30MW pohánějící mezinárodní letiště v Římě.[35] Takové uložště by navíc mohla poskytovat energii v období špičkového zatížení a také při regulaci frekvence nebo podle požadavku provozovatele sítě.[34] Velký význam by také mohlo být jejich uplatnění v malých bateriových systémech skladování energie pro domácnosti.[35] Své uplatnění naleznou také jako záložní zdroje pro telekomunikace, UPS nebo ve spojení se smart grid.[34]

4. TESTY PRO VYHODNOCENÍ STAVU AKUMULÁTORŮ PŘED POUŽITÍM

Akumulátorové články získané po demontáži použitých baterií je třeba otestovat, jak již bylo nastíněno předešlých člancích, aby bylo možné určit jejich vhodnost pro možné následující využití. Všechna tato měření jsou extrémně důležitá pro správnou a bezpečnou funkci systému BMS. Z toho se následně odvíjí bezpečný chod celého systému ukládání energie.

4.1 State of charge (SOC)

SOC je klíčový indikátor stavu baterie, který popisuje, kolik energie zbývá v baterii. SOC poskytuje informace, aby se zabránilo jevům, jako je přebíjení nebo nadměrné vybíjení. Používá se také jako ukazatel výkonu k určení, kolik energie může být dodáno nebo přijato z ESS. Kromě toho může být SOC základem dalších indikátorů, jako je stav funkce (SOF) a stav bezpečnosti (SOS). Proto je vyžadována vysoká přesnost odhadu SOC pro minimalizaci chyb pro jiné stavy baterie, pro ochranu před nebezpečnými poruchami a pro řízení provozních podmínek BMS. SOC však nelze měřit přímo. SOC bývá teda odhadnuta na základě měřitelných informací z baterie, jako je napětí, proud, a teplota. Obecně bývá SOC definována jako poměr aktuálně dostupné kapacity nabíjení/vybíjení a maximální dostupné kapacity nabíjení/vybíjení během provozu. SOC může být vypočítána následujícím způsobem:

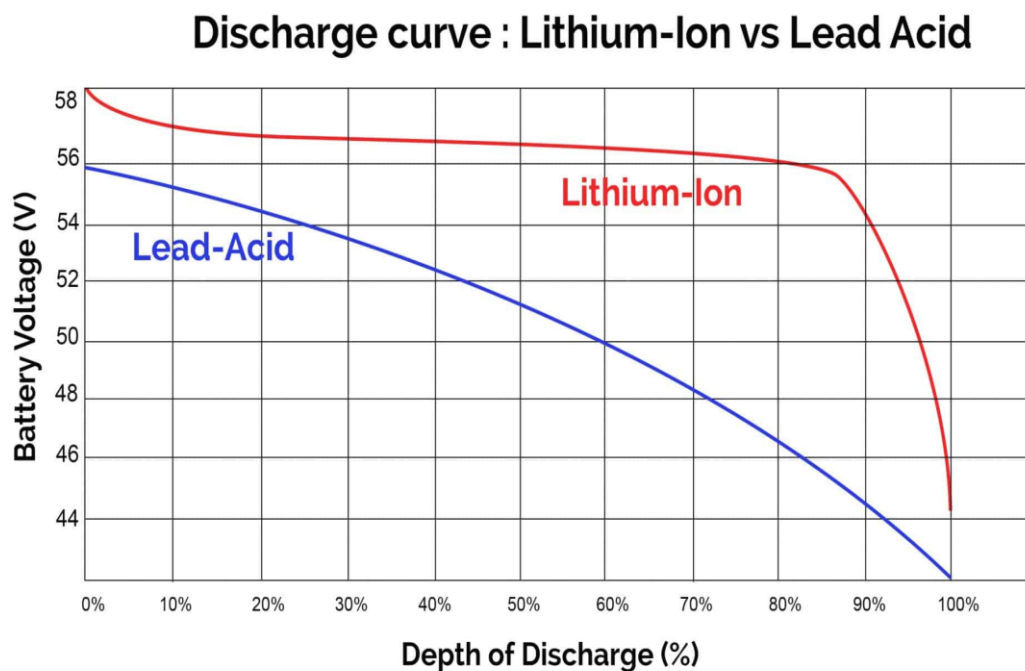
$$SOC(k) = SOC(k - 1) - \int_{t-1}^t \eta \frac{I(\tau)}{Q_n} d\tau, \quad (4.1)$$

kde Q_n je jmenovitá kapacita, τ symbolizuje časovou proměnnou a η vyjadřuje Coloumbická účinnost. SOC(k) a SOC(k-1) vyjadřují SOC v čase k a v čase k-1.[37]

K přesnému odhadu SOC je proto požadována dobrá přesnost proudového senzoru a krátká perioda vzorkování. Důvodem obtížnosti provedení odhadu SOC je také měnící se jmenovitá kapacita, která se mění za různých podmínek. Q_n se může měnit v závislosti na stárnutí baterie, vnějších a vnitřních podmínkách, jako jsou změny teploty a mechanické namáhání. Přesnost odhadu SOC je klíčová pro návrh a správnou funkci systému BMS. [37]

Jednou z klíčových metod odhadu stavu SOC je metoda testování napětí naprázdno nebo také známá pod zkratkou OCV. Vychází ze společné vlastnosti baterií, což je zvýšení nebo snížení napětí na svorkách baterie v závislosti na úrovni jejich nabití. Tento vztah mezi napětí a SOC je přímo závislý na použité technologii baterie. Z obrázku 4.1 je možné vidět, že olověné baterie mají relativně lineární křivku, což umožňuje dobrý odhad stavu nabití, jelikož z naměřeného napětí je možné poměrně přesně odhadnout související SOC. Lithium iontové baterie mají vybíjecí křivku však mnohem plošší, což

znamená, že v širokém provozním rozsahu se napětí na svorkách baterie mění mírně. Tento tvar křivky dosti ztěžuje samotný odhad stavu nabití na jednoduchém měření napětí. Rozdíl napětí mezi dvěma hodnotami SOC může být tak malý, že není možné odhadnout stav nabití s dobrou přesností.[39] Z toho důvodu je samotné využití této techniky nevhodné u lithiové baterie, ale přesto bývá využívána v systémech s lithium iontovými bateriemi, ale pouze vždy s kombinací s dalším měření, technikou sloužících k určení SOC.[36]



Obrázek 4.1 Porovnání vybíjecí charakteristiky li-ion a olověné baterie. [38]

Mezi velmi populární metody se řadí také metoda s využitím Kalmanova filtru, která může značně pomoci v určení úrovně SOC baterie. Tato metoda je postavená na měření a analýze vstupních a výstupních dat baterie, jako je napětí, proud, teplota, vnitřní odpor a další parametry. Na základě těchto informací je možné pomocí Kalmanova filtračního algoritmu sestavit elektrický model baterie a provést simulaci jejího chování za provozních podmínek a odhadnout stav nabití. Samotná metoda je složena ze dvou kroků. V první části se zadávají vstupní data do modelu a znázorní se fyzikální procesy probíhající v baterii jako matematické rovnice. Na základě výpočtu se určí předpověď chování baterie a výstupní data. V druhé části se použijí skutečné změřené hodnoty, které se poté porovnají s předpovězenými hodnotami. Poté algoritmus filtruje nebo upravuje model, aby se snížila možná odchylka. Závislost spolehlivosti a přesnosti této metody je přímo spojená s přesností elektrického modelu, matematických rovnic a zadaných parametrech. Jde o jednu z nejpřesnějších a nejmodernějších technologií k odhadu SOC, která dokáže pracovat s lineárními i nelineárními systémy. [36]

Existuje celá řada dalších alternativních metod k dohadu SOC, jako jsou:

- Umělá neuronová síť. Neuronová síť může odhadnout SOC čerpáním z velkého množství vstupních dat baterie, jako je napětí, proud, teplota a reprodukováním nelineárních vztahů mezi těmito parametry.[36]
- Impedanční metoda. Ta vychází z měření vnitřní impedance baterie, která se mění v průběhu cyklů nabíjení a vybíjení.[36]
- Fuzzy logika. K vytvoření modelu pomocí fuzzy logiky je možné použít jakákoli data baterie, i když jsou abstraktní a přibližná. Po analýze dat může model určit charakteristiku baterie, včetně stavu nabití. Klíčovým požadavkem pro provedení fuzzy logiky a analýzy pomocí umělé neuronové sítě je vysoký výkon mikrokontrolerů.[36]
- Ultrazvuková detekce. Metoda spočívá v odhadu SOC pomocí technologie ultrazvukové řízení vlny. Díky své citlivosti mohou vlnové signály pomocí určit strukturu baterie a vyhodnotit její kapacitu a celkový stav.[36]
- Metoda svorkového napětí. Tato metoda spočívá v měření svorkového napětí baterie, které se během vybíjení snižuje. SOC se vypočítá na základě proporcionálních vztahů mezi elektromotorickou silou baterie, jejím svorkovým napětím a stavem nabití. Při výpočtu může dojít ke vzniku chyby v důsledku prudkého poklesu svorkového napětí na konci vybíjení. [36]

4.2 State of health (SOH)

Jak baterie stárne, degraduje a její výkon klesá. Pokud maximální dostupná kapacita nabíjení/vybíjení dosáhne kapacity 80% jmenovité kapacity bude nutné baterii vyměnit. Pokud baterie dosáhla této úrovně již není možné ji využívat k původní aplikaci z důvodu nemožnosti reakce na požadované špičkové zatížení.[37]

Široce používanými parametry pro odhad SOH jsou maximální dostupná kapacita nabíjení/vybíjení a vnitřní odpor baterie během stárnutí. SOH lze vypočítat následně:

$$SOH_C = \frac{Q_C}{Q_n} \cdot 100, \quad (4.2)$$

$$SOH_R = \left| \frac{R_C - R_a}{R_n - R_a} \right| \cdot 100, \quad (4.3)$$

kde SOH_C a SOH_R jsou SOH na základě kapacity a vnitřního odporu. Kromě toho Q_C je maximální dostupná kapacita nabíjení/vybíjení během stárnutí baterie, Q_n je jmenovitá kapacita, R_n je počáteční vnitřní odpor baterie, R_C je aktuální vnitřní odpor a R_a je vnitřní odpor staré baterie na konci její životnosti. Aby bylo možné odhadnout SOH na základě odporu, musí být referenční hodnota odporu, kterou lze určit během stárnutí, získaná pomocí předchozích experimentů nebo jako korelace mezi kapacitou a odporem. [37]

Vnitřní odpor baterie závisí na materiálu elektrody. Dostupná kapacita a výkon baterie silně souvisí s vnitřním odporem. Vnitřní odpor je takovým nepřímo úměrným ukazatelem SOH, čím vyšší je vnitřní odpor, tím nižší je state of health. Samotný vnitřní odpor je možné vypočítat měřením napětí naprázdno a napětí s připojenou proudovou zátěží. Díky jejich rozdílu získáme úbytek napětí a poté je možné jednoduše vypočítat vnitřní odpor baterie pomocí Ohmova zákona.[36]

$$R = (OCV - U)/I \quad (4.4)$$

kde R – odpor, OCV – napětí naprázdno, U – napětí a I – proud. Popřípadě ho můžeme získat pomocí Jouleova zákona, nebo získat z impedance baterie pomocí elektrochemické impedance spektroskopie (EIS). [36]

S postupnou degradací se zvyšuje také impedance baterie stejně jako odpor. Z tohoto důvodu můžeme k odhadu stavu SOH použít i měření impedance. Jak bylo uvedeno výše, impedance baterie lze změřit metodou EIS, která využívá k měření střídavý proud na různých frekvencích, díky kterému poté určí impedanci jako funkci frekvence. Tato technika poskytuje vysokou přesnost a odhad degradace baterie. [36]

Další možností určení SOH je zaměření se na počet cyklů nabití/vybití, výpočet zbývajících počtu cyklů je jednou z nejjednodušších a nejdostupnějších metod. Za referenční bod se považuje životnost uváděná výrobcem baterie. Tato metoda nedisponuje vysokou úrovní přesnosti, jelikož zanedbává významné faktory jako napětí, proud, provozní podmínky.[36]

Pro možnost určení SOH můžeme využít známé techniky, které se využívají ke stanovení stavu SOC, jako jsou:

- Coulombovo počítání – při poklesu state-of-health dochází zároveň také ke ztrátě kapacity baterie. SOH je tedy možné zjistit, jakmile je známá rychlost, s jakou kapacita v průběhu času klesá.[36]
- Kalmanovo filtrování. Kalmanův filtr vychází z různých parametrů baterie, včetně vnitřního odporu, který je nezbytný pro určení SOH. Algoritmus dokáže sledovat chování baterie v reálném čase a předvídat její opotřebení a stárnutí.[36]
- Fuzzy logika. Modely s fuzzy logikou mohou využívat vnitřní odpor, impedanci a další parametry jako vstupní data pro vyhodnocení SOH baterie. K použití této metody nejsou potřeba úplné a komplexní údaje o baterii. [36]
- Umělá neuronová síť. Neuronové sítě mohou zpracovávat lineární i nelineární data. Analýzou vnitřních parametrů baterie mohou neuronové sítě odhadnout SOH za různých podmínek.[36]

Mechanismus stárnutí baterie je velmi složitý z hlediska různých stresových faktorů stárnutí. Podle různých studií, které zkoumaly faktory, které degradují baterie, jako je vysoká/nízká teplota, vysoké/nízké napětí, vysoký proud nebo vysoký tlak. Tyto stresové faktory stárnutí způsobují úbytek zásoby lithia a aktivního materiálu a ukazují zvýšenou

impedanci. Což vede ke snížení kapacity baterie. Nepřesný odhad SOH může ohrozit bezpečnost bateriového systému a snížit provozní efektivitu. Metoda SOH je základem pro stanové zbývající životnosti baterie. [37]

4.3 State of function (SOF)

Výrobci baterií poskytují uživatelům omezení, jako je horní/dolní limit napětí baterie, limit proudu při nabíjení/vybíjení a rozsah provozních teplot, aby došlo k zajištění bezpečnosti baterie. Z hlediska nutnosti zajištění bezpečnosti baterie musí fungovat bezpečnostně provozní oblast, která je navržena výrobcem. Tato samotná oblast by se měla měnit v závislosti na stárnutí baterie a podmínkách prostředí. Funkce baterie se zhoršují v důsledku zhoršujících se vlastností veličin, jako je odpor a kapacita. SOF se používá jako indikátor stavu baterie k předpovědi maximální okamžité výstupní kapacity a provozu v rámci provozní oblasti. Což můžeme vypočítat pomocí rovnic:

$$P(t) = P_{max} \cdot SOC(t) \cdot SOH(t), \quad (4.5)$$

$$SOF(t) = \frac{P(t) - P_d(t)}{P_{max} - P_d(t)}, \quad (4.6)$$

kde $P(t)$ a P_d jsou okamžité výstupní hodnoty výkonu poskytované baterií a poptávkou po výkonu v čase t . P_{max} je maximální výkon, který může baterie poskytnout zátěži, když je baterie nová. Jak je zobrazeno v rovnici 4.5, samotné určení SOF je ovlivněno přesností metody SOC a SOH. [37]

4.4 State of temperature (SOT)

Dynamické vlastnosti baterie jsou velmi citlivé a závislé na teplotě. Kromě toho značně roste poptávka po bateriových sadách s vysokou hustotou z důvodu zvýšeného požadavku po vysokoenergetické ESS. V důsledku toho se akumulátorové sady s vysokou hustotou potýkají s problémy s tepelným managementem v důsledku vzniku tepla během nabíjení a vybíjení. [37]

Při provozu bateriových článků a sad mimo správný teplotní rozsah dochází k rychlenému poklesu kapacity baterie a nárůstu odporu. Kromě toho může být baterie indukována k tepelnému úniku v důsledku výskytu mechanického, elektrického a tepelného namáhání. Z toho důvodu je pro nás charakteristika vzniku a odvádění tepla v lithium-iontových člancích a sadách velmi důležitá. V reakci na to byl představen tepelný model založený na energetické bilanci mezi vznikem a odvodem tepla:

$$\frac{d}{dt} Q_{accu} = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{d}{dt} Q_{gen} - \frac{d}{dt} Q_{dis} \quad (4.7)$$

Na základě tepelného modelu byl představen elektrochemicko-tepelný model a elektrotepelný model. Elektrochemicko-tepelný model a elektrotepelný model jsou široce používány jako modely generování tepla pro analýzu tepelného chování baterie. Elektrochemicko-tepelný model představuje teplo generované chemickými reakcemi lithium-iontové baterie, jako je: nadměrný potenciál, transport iontů v elektrolytu, ohmické ztráty v elektrodách a entropie v průběhu nabíjení/vybíjení. Tento model však představuje velkou výpočetní zátěž z důvodu aplikace velkého počtu rovnic, které jsou potřeba k predikci teploty baterie. [37]

Elektrotepelný model byl odvozen pomocí elektrických veličin nahrazujících elektrochemické členy v elektrochemicko-tepelném modelu pro celý článek. Vzniklé teplo v elektro-tepelném modelu závisí na nevratném teple, protože vratné teplo je velmi malé v porovnání s nevratným teplem, když baterie poskytuje velký proud. [37]

Generované teplo v elektro-tepelném modelu na nevratném teple, protože vratné teplo je velmi malé v porovnání s nevratným teplem, když baterie dodává velký proud.[37]

Ve srovnání s elektrochemicko-tepelným modelem je počet požadovaných výpočtů dostatečně nízký, aby bylo možné elektro-tepelný model rozšířit na úroveň bateriového modulu a systému. Chyby v odhadech mohou být způsobeny parametry baterie, jako je napětí naprázdno a odpor.[37]

5. NÁVRH BATERIOVÉ ÚLOŽIŠTĚ S AKUMULÁTORY V DRUHÉM ŽIVOTNÍM CYKLU

Tabulka 5.1 Návrh uložště č.1 o požadované velikosti 12kWh za využití LiFePO₄ baterií.

2kWh , LiFePO4 (3,2V/280Ah) 85%	
požadované uložště [kWh]	12
uspořádání baterií	16S1P
počet článků	16
E(100%) [Wh]	14336
E(80%) [Wh]	12185,6
Q (100%) [Ah]	280
Q(85%) [Ah]	238
U _n [V]	51,2
U _{max} [V]	57,6
U _{min} [V]	40
Ivybíjecí IC [A]	238
P _{max} [W]	12185,6
P _n IC [W]	12185,6

Příklad výpočtu a postupu při návrhu uložště.

Zpočátku byl proveden výpočet počtu potřebných článků:

$$n = \frac{E_0}{0,85 \cdot Q_{N-\text{článku}} \cdot U_{N-\text{článku}}} = \frac{12000}{0,85 \cdot 280 \cdot 3,2} = 15,75$$

= 16 článků

(5.1)

Z celkového počtu použitých článků je možné určit jejich celkovou energii při 100% kapacity a 85% kapacity:

$$E_{100\%} = n \cdot U_{N-\text{článku}} \cdot Q_{N-\text{článku}} = 16 \cdot 3,2 \cdot 280 = 14336 \text{ Wh} \quad (5.2)$$

$$E_{85\%} = n \cdot U_{N-\text{článku}} \cdot Q_{N-\text{článku}} \cdot \text{pokles} = 16 \cdot 3,2 \cdot 280 \cdot 0,85 = 12\,185,6 \text{ Wh} \quad (5.3)$$

, kde $Q_{N-\text{článku}}$ je jmenovitá kapacita nového článku.

Následně byl proveden odhad uspořádání sériově propojených baterií:

$$n_s = \frac{U_{\text{max-uložště}}}{U_{\text{max-článku}}} = \frac{57,6}{3,6} = 16 \text{ článků} \quad (5.4)$$

, $U_{\text{max-uložště}}$ určená hodnota napětí uložště, která nesmí být překročena.

Následně bylo možné určit jmenovitou, maximální, minimální hodnotu napětí uložistiště:

$$U_N = n_S \cdot U_{N-\text{článek}} = 16 \cdot 3,2 = 51,2V \quad (5.5)$$

$$U_{min} = n_S \cdot U_{min-\text{článek}} = 16 \cdot 2,5 = 40 V \quad (5.6)$$

$$U_{max} = n_S \cdot U_{max-\text{článek}} = 16 \cdot 3,6 = 57,6 V \quad (5.7)$$

, kde $U_{N-\text{článek}}$, $U_{min-\text{článek}}$, $U_{max-\text{článek}}$ jsou hodnoty dané parametry baterie.

Dále je provedeno určení paralelních větví:

$$n_P = \frac{E_{100\%}}{U_N \cdot Q_{N-\text{článek}}} = \frac{14336}{51,2 \cdot 280} = 1 \quad (5.8)$$

V závislosti na paralelních větvích je možné určit kapacitu uložistiště:

$$Q_{100\%} = n_P \cdot Q_{N-\text{článek}} = 1 \cdot 280 = 280Ah \quad (5.9)$$

$$Q_{85\%} = n_P \cdot Q_{N-\text{článek}} \cdot 0,85 = 1 \cdot 280 \cdot 0,85 = 238Ah \quad (5.10)$$

Vypočet vybíjecí proudu jednoho článků při 1C:

$$I_{vybíjecí} = Q_{N-\text{článek}} \cdot \text{pokles} \cdot C = 280 \cdot 0,85 \cdot 1 = 238A \quad (5.11)$$

Výpočet výstupního výkonu, který je možné získat:

$$P_{max} = n_P \cdot I_{vybíjecí} \cdot U_N \cdot C = 1 \cdot 238 \cdot 51,2 \cdot 1 = 12185,6W \quad (5.12)$$

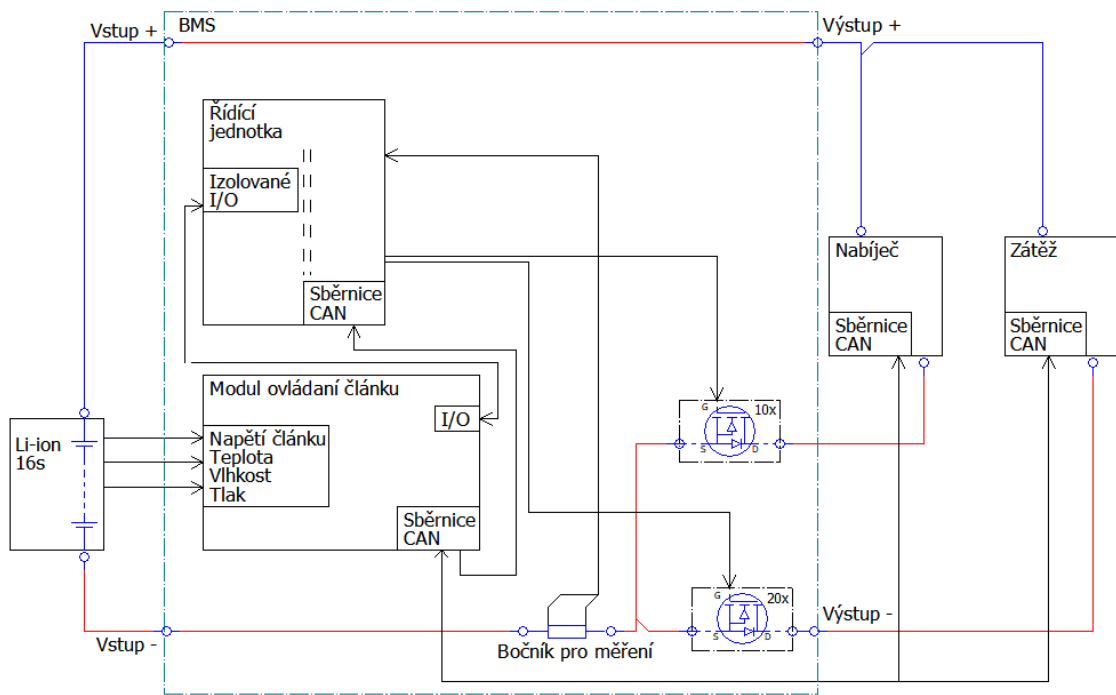
$$P_{1C} = n_P \cdot I_{vybíjecí} \cdot U_N \cdot C = 238 \cdot 51,2 \cdot 1 = 12185,6W \quad (5.13)$$

, kde maximální možné násobky vybíjecích proudů jsou dány parametry a možnostmi baterie, za C jsou dosazovány násobky vybíjecích proudů dle typu akumulátoru (1,2,3...).

Pro tvorbu energetického uložistiště o požadované úložné velikosti energie o 12kWh byly použity baterie typu LiFePO4. Tyto baterie disponují značně větší kapacitou oproti olověným bateriím. Zde je kapacita jednoho článku snížena na 85 % vůči původnímu, z čehož nám vychází, že jedna baterie disponuje kapacitou o velikosti 238 Ah. Z důvodu požadované velikosti 12 kWh bylo nutno použít více bateriových článků, jako by bylo použito pro uložistiště s využitím nových akumulátorů.

Cílem tvorby uložistiště bylo použití baterií, které již disponují sníženou kapacitou a to kapacitou, která se nachází na 85% původní hodnoty. Daná kapacita je snížena z důvodu původního využívání baterií k jiné aplikaci. Pro dosažení dostačující velikosti uložistiště a napětí bylo zvoleno uspořádání 16 sériově a 1 paralelní větvě, dohromady bylo potřeba 16 článků o jmenovitém napětí 3,2V/článek. Možná úložná energie je 12,1856 kWh.

Po zapojení 16 sériově propojených článku jsme získali jmenovitou hodnu napětí o hodnotě 51,2 V. Minimální možnou hodnotu napětí, do které lze bateriové uložení vybíjet je 40 V, aby nedošlo k zhoršení degračních procesů. Maximálním možným napětím z hlediska nabití je hranice 57,6 V. Maximálním možným bezpečným vybíjecím proudem při použití tohoto typu baterií je proud o velikosti 1C, z čehož nám vychází proud o velikosti 238 A, kdy při použití této velikosti proudu dokážeme dostat z uložení výkon o velikosti 12 185,6W, což je zároveň maximální i jmenovitou hodnotou výkonu pro tento typ uložení. Cílem využití tohoto vytvořeného uložení by bylo ukládání přebytečné energie ze solárních panelů.



Obrázek 5.1 Příkladový návrh blokového zapojení energetického uložení

Tabulka 5.2 Návrh uložště č.2 o požadované velikosti 12kWh za využití prizmatických článků Molicel.

12kWh , Molicel INR 21700-P42B(3,6V/4,2Ah) 85%	
požadované uložště [kWh]	12,0
uspořádání baterií	13S72P
počet článků	936,0
E(100%) [Wh]	14152,3
E(80%) [Wh]	12029,5
Q (100%) [Ah]	302,4
Q(85%) [Ah]	257,0
Un [V]	46,8
Umax [V]	57,2
Umin [V]	32,5
Imax vybíjecí 10C [A]	35,7
Ivybíjecí 1C [A]	3,57
Pmax 10C [W]	120294,7
P 1C [W]	12029,5

Pro tvorbu energetického uložště o požadované úložné velikosti energie o 12kWh byly použity baterie typu Molicel, což je typ baterie li-ion. Tyto baterie disponují nižší kapacitou oproti LiFePO₄, ale dokážou být vystaveny vybíjecímu proudu o velikosti až 10 C.

Zde je kapacita jednoho článku snížena na 85 % vůči původnímu, z čehož nám vychází, že jedna baterie disponuj kapacitou o velikosti 3,57 Ah. Z důvodu požadované velikosti 12 kWh bylo nutno použít více bateriových článků, jako by bylo použito pro uložště s využitím nových akumulátorů.

Cílem tvorby uložště bylo použití baterií, které již disponují sníženou kapacitou a to kapacitou, která se nachází také na 85% původní hodnoty. Daná kapacita je snížena z důvodu původního využívání baterií k jiné aplikaci.

Pro dosažení dostačující velikosti uložště a napětí bylo zvoleno uspořádání 13 sériově a 72 paralelně uspořádaných větví, dohromady bylo potřeba 936 článků o jmenovitém napětí 3,6V/článek. Zvýšený počet článků je způsoben v závislosti na typu použitého článku. Možná úložná energie je 12,029kWh.

Po zapojení 13 sériově propojených článku jsme získali jmenovitou hodnu napětí o hodnotě 46,8 V. Minimální možnou hodnotu napětí, do které lze bateriové uložště vybíjet je 32,5 V, aby nedošlo k zhoršení degradačních procesů. Maximálním možným napětí z hlediska nabití je hranice 57,2 V.

Maximálním možným bezpečným vybíjecím proudem při použití toho typu baterií je proud o velikost 10C, z čehož nám vychází proud o velikosti 35,7 A na článek, kdy při použití této velikosti proudu dokážeme získat z uložště krátkodobě výkon o velikosti 120,2947 kW. Při vybíjení uložště o proudu 1C získáváme výkon o možné velikosti

12029,472 W. Cílem využití tohoto vytvořeného uložisti by bylo ukládání přebytečné energie ze solárních panelů, toto uložisti je alternativou uložisti s využitím článků LiFePO_4 . Při využití článků MOlicel je v porovnání s články na bázi LiFePO_4 možno dosáhnout vyššího výkonu. Postup samotného návrhu probíhal obdobně jako v uložisti č.1.

Tabulka 5.3 Návrh uložisti č.3 o požadované velikosti 4kWh s využitím olověných baterií typu OTL100-12.

4kWh , Olověná (12V/100Ah) 80%	
požadované uložisti [kWh]	4
uspořádání baterií	1S5P
počet článků	5
E(100%) [Wh]	6000
E(80%) [Wh]	4800
Q (100%) [Ah]	500
Q (85%) [Ah]	400
Un [V]	12
Umax [V]	13,8
Umin [V]	10,5
Imax 10C [A]	800
Ivybíjecí 1C [A]	80
Pmax[W]	48000,00
P 1C [W]	4800
P 3C [W]	14400
GOOWEI ENERGY OTL100-12, 100Ah, 12V	

Cílem tvorby tohoto typu uložisti byla možná aplikace zdroje elektrické energie v karavanech. Požadovaná velikost uložisti, která by se následně využívala jako energetický zdroj v karavanech byla 4kWh a byly zde aplikovány baterie od značky GOOWEI ENERGY typu OTL100-12, které disponují základními hodnotami 12V/100Ah. Jedná se o olověné trakční akumulátory, které byly z předpokladu původně využívány k jiným aplikacím.

Z tohoto důvodu se vychází z poklesu původní hodnoty kapacity na hodnotu 80 % vůči původnímu. Bylo zvoleno uspořádání 1S5P, kdy díky tomuto rozložení získáváme jmenovitou hodnotu napětí 12 V, maximálním možným napětím z hlediska nabíjení je napětí o velikosti 13,8V. Minimální bezpečnou hodnotou napětí, pod kterou by nemělo bateriové uložisti klesnout je 10,5 V.

Celková možná úložná energie disponuje 4800 Wh, přičemž v porovnání s novými články je to o 1200Wh méně. Samotná kapacita se aktuálně pohybuje na úrovni 400Ah. Pro bateriové uložisti byly stanoveny okamžité výkony, které je možné získat při vybíjecím proudu o velikosti 1C,3C,10C, jak je zobrazeno v tabulce výše. Postup

samotného návrhu probíhal obdobně jako v uložišti č.1 s ohledem na rozdílný typ baterií a rozdílného poklesu kapacity článků.

Tabulka 5.4 Návrh uložišť č.4 o požadované velikosti 4kWh s využitím olovených baterií typu F1

4kWh , Olovená (6V/12Ah) 80%	
požadované uložišť [kWh]	4
uspořádání baterií	2S35P
počet článků	70
E (100%) [Wh]	5040
E(80%) [Wh]	4032
Q (100%) [Ah]	420
Q(80%) [Ah]	336
Un [V]	12
Umax [V]	14,4
Umin [V]	9,6
Imax 10C [A]	96,00
Ivybíjecí 1C [A]	9,6
Pmax 10C [W]	40320
P 1C [W]	4032
P 3C [W]	12096
baterie Long, 12Ah olovený akumulátor F1	

Cílem tvorby tohoto typu uložišť byla možná aplikace zdroje elektrické energie v karavanech. Požadovaná velikost uložišť, která by se následně využívala jako energetický zdroj v karavanech byla 4kWh. Jedná se o olovené trakční akumulátory F1, které byly z předpokladu původně využívány k jiným aplikacím.

Z tohoto důvodu se vychází z poklesu původní hodnoty kapacity na hodnotu 80 % vůči původnímu. Bylo zvoleno uspořádání 2S35P, kdy díky tomuto rozložení získáváme jmenovitou hodnotu napětí 12 V, maximálním možným napětím z hlediska nabíjení je napětí o velikosti 14,4V. Minimální bezpečnou hodnotou napětí, pod kterou by nemělo bateriové uložišť klesnout je 9,6 V.

Celková možná úložná energie disponuje 4032 Wh, přičemž v porovnání s novými články je to 1008 Wh méně. Samotná kapacita se aktuálně pohybuje na úrovni 336Ah. Pro bateriové uložišť byly stanoveny okamžité výkony, které je možné získat při vybíjecím proudu o velikosti 1C,3C,10C, jak je zobrazeno v tabulce výše.

V porovnání s bateriemi použitými v předešlém návrhu, tak tento typ baterií disponuje polovičním napětím 6V a značně nižší kapacitou o základní hodnotě 12Ah, což ještě v závislosti na poklesu kapacity zapříčiní celkovou potřebu 70 kusů baterií. Postup samotného návrhu probíhal obdobně jako v uložišti č.1 s ohledem na rozdílný typ baterií a rozdílného poklesu kapacity článků

Tabulka 5.5 Návrh uložště č.5 o požadované velikosti 8kWh s využitím olověných baterií typu OTL100-12.

8kWh , Olověná (12V/100Ah) 80%	
požadované uložště [kWh]	8
uspořádání baterií	4S3P
počet článků	12
E(100%) [Wh]	14400
E(80%) [Wh]	11520
Q (100%) [Ah]	300
Q(80%) [Ah]	240
Un [V]	48
Umax [V]	55,2
Umin [V]	42
Imax (10C) [A]	800,00
Ivybíjecí (1C) [A]	80
Pmax[W]	115200
P 1C [W]	11520
P 3C [W]	34560
GOOWEI ENERGY OTL100-12, 100Ah, 12V	

Cílem tvorby tohoto typu uložště byla možná aplikace pro uchovávání přebytečné energie ze solárních panelů. Požadovaná velikost uložště, která by se následně využívala pro uchování energie o velikosti 8kWh. Pro aplikaci byly zvoleny baterie od značky GOOWEI ENERGY typu OTL100-12, které disponují základními hodnotami 12V/100Ah. Jedná se o olověné trakční akumulátory, které byly z předpokladu původně využívány k jiným aplikacím. Z tohoto důvodu se vychází z poklesu původní hodnoty kapacity na hodnotu 80 % vůči původnímu.

Bylo zvoleno uspořádání 4S3P, kdy díky tomuto rozložení získáváme jmenovitou hodnotu napětí 48 V, maximálním možným napětím z hlediska nabíjení je napětí o velikosti 55,2V. Minimální bezpečnou hodnotou napětí, pod kterou by nemělo bateriové uložště klesnout je 42V.

Celková možná úložná energie disponuje 11520 Wh, což je vyšší, než je požadovaná hodnota. Prakticky se bude využívat pouze energie o velikosti 8kWh, díky tomu se předejde zvýšené degradaci, když baterii nebudeme plně vybíjena. Pro bateriové uložště byly stanoveny okamžité výkony, které je možné získat při vybíjecím proudu o velikosti 1C,3C,10C, jak je zobrazeno v tabulce výše. Postup samotného návrhu probíhal obdobně jako v uložšti č.1 s ohledem na rozdílný typ baterií a rozdílného poklesu kapacity článků.

Tabulka 5.6 Návrh uložště č.6 o požadované velikosti 8kWh s využití olověných baterií typu F1

8kWh , Olověná (6V/12Ah) 80%	
požadované uložště [kWh]	8
uspořádání baterií	8S18P
počet článků	144
E (100%) [Wh]	10368
E(80%) [Wh]	8294,4
Q (100%) [Ah]	216
Q(80%) [Ah]	172,8
Un [V]	48
Umax [V]	57,6
Umin [V]	38,4
Imax 10C [A]	96,00
Ivybíjecí 1C [A]	9,6
Pmax 10C [W]	82944
P 1C [W]	8294,4
P 3C [W]	24883,2
baterie Long, 12Ah olověný akumulátor F1	

Cílem tvorby tohoto typu uložště byla možná aplikace pro uchovávání přebytečné energie ze solárních panelů. Požadovaná velikost uložště, která by se následně využívala pro uchování energie byla 8kWh. Pro tvorbu uložště byly využity akumulátory typu F1, které disponují základními hodnotami 6V/12Ah na akumulátor. Jedná se o olověné trakční akumulátory, které byly z předpokladu původně využívány k jiným aplikacím. Z tohoto důvodu se vychází z předpokladu poklesu původní hodnoty kapacity na hodnotu 80 % z původních 100 procent.

Bylo zvoleno uspořádání 8S18P, jedná se o alternativu k uložšti, kde byly využity baterie od značky GOOWEI ENERGY typu OTL100-12, které disponují základními hodnotami 12V/100Ah. Celé uložště čítá 144 článků, což je značně vyšší počet než při využití typu OTL100-12. Po uspořádání 8 sériově propojených baterií je dosaženo jmenovité hodnoty napětí 48 V, maximálního možného napětím z hlediska nabíjení je napětí o velikosti 57,6V. Minimální bezpečnou hodnotou napětí, pod kterou by nemělo bateriové uložště vybito je 38,4V.

Celková možná úložná energie disponuje 8294,4 Wh. Samotná kapacita dosahuje 172,8Ah. Pro bateriové uložště byly nastíněny okamžité výkony, které je možné získat z uložště při vybíjecích proudech o velikosti 1C,3C,10C. Krátkodobě by bylo možné získat až výkon o 82944 W. Postup samotného návrhu probíhal obdobně jako v uložšti č.1 s ohledem na rozdílný typ baterií a rozdílného poklesu kapacity článků.

ZÁVĚR

V bakalářské práci byly rozebrány možnosti akumulace elektrické energie a problematika, která se pojí s jednotlivými možnostmi jejího ukládání. První část je věnována převážně typům používaných akumulátorů, které jsou založené na elektrochemické bázi, kdy je energie uchována v podobě chemické reakce. Z provedené analýzy jednotlivých typů akumulátorů se jeví komplexně nejvyužitelnější a nejvýhodnější z hlediska vlastností lithium iontové. U využití toho typu akumulátoru je nutné dbát vyšší ohled na bezpečnost. Velkým obsazením na trhu stále disponují olověné baterie, které se jeví velmi výhodné z hlediska ceny a dostupnosti, ale problémem je nutná opatrnost z hlediska vybíjení baterie a také nižší gravimetrická hustota. Představena je také další alternativa ukládání energie, a to ukládání energie pomocí superkondenzátoru, které dokážou efektivně uchovávat ve velmi krátkém čase velké množství energie.

Další část pojednává o možnosti opětovného použití akumulátorů po skončení jejich prvního životního cyklu. Je zde představen celý poměrně komplikovaný proces přípravy a třídění baterií před jejich následným použitím. V samotném procesu se určí potenciální baterie, které mohou být ještě využity, zbytek putuje k recyklaci nebo je zlikvidován. Nejrozšířenější typy akumulátorů pro praktickou aplikaci v režimu second life jsou z hlediska největšího rozšíření li-ion a olověné.

Následně je představeno složení uložistiště, kdy se samotná tvorba bateriového úložného systému z akumulátorů druhé životnosti v podstatě neliší od systému tvořeného novými bateriemi. Pouze bude více zatěžovaný systém BMS, který provádí dohled nad stavem baterií a bezpečným chodem celého uložistiště. U akumulátorů v druhém životním cyklu se musí uvažovat s jejich menší stabilitou, která se pojí se sníženou kapacitou, rozdílným napětí a zvýšeným vnitřním odporem. Je také nutné brát ohled na zvýšenou citlivost v závislosti vystavení článků vyšším teplotám a samotnému zvýšení oteplování článků v systému.

V této souvislosti jsou představeny testy potřebné k vyhodnocení stavu akumulátorů v druhém životním cyklu. Provedení testů jako jsou SOH, SOC, SOT, SOF se ukazují jako extrémně důležité pro správnou a bezpečnou funkci systému BMS. Z čehož se následně odvíjí bezpečný chod celého systému ukládání energie.

V závěru jsou provedeny praktické návrhy bateriových uložistišť s využitím akumulátorů v druhém životním cyklu a příklad blokového zapojení. Pro tvorbu byly aplikovány akumulátory na bázi LiFePO_4 , akumulátory využívané v elektromobilitě od zástupce MOLICEL a trakční olověné. Z vytvořených uložistišť je patrné, že je zapotřebí více článků a s tím se pojí nárůst hmotnosti a objemu celkového systému. Snížená kapacita článků druhé životnosti má také vliv na velikost výstupního výkonu a vybíjecího proudu. Z hlediska praktičnosti se ukazuje, že bude nejvhodnější jejich využití při stacionárních aplikacích.

LITERATURA

- [1] CENEK, Miroslav. Akumulátory od principu k praxi. Praha: FCC Public, 2003. ISBN 80-86534-03-0.
- [2] Battery University: How does the Lead Acid Battery Work? [online]. [cit. 2022-10-21]. Dostupné z: <https://batteryuniversity.com/article/bu-201-how-does-the-lead-acid-battery-work>
- [3] Olověné akumulátory [online]. [cit. 2022-10-23]. Dostupné z: <https://canov.jergym.cz/elektro/clanky2/olov.pdf>
- [4] *Tzbinfo: Jak funguje olověný akumulátor?* [online]. 2017 [cit. 2022-10-23]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektriny/16090-jak-funguje-oloveny-akumulator>
- [5] MAREK, Jiří a Luděk STEHLÍK. Hermetické akumulátory v praxi. Praha: IN-EL, 2004. Elektro (IN-EL). ISBN 80-86230-34-1.
- [6] ScienceDirect: Nickel Metal Hydride Battery [online]. [cit. 2022-10-30]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/nickel-metal-hydride-battery>
- [7] Nickel Metal Hydride Battery Safety Notes | GlobTek
- [8] NiZn akumulátory [online]. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, 2012 [cit. 2022-10-26]. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/handle/11025/705>
- [9] ScienceDirect: Nickel Zinc battery [online]. [cit. 2022-10-26]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/nickel-zinc-battery>
- [10] Batterym: Working of lithium ion battery: A brief introduction [online]. [cit. 2022-11-06]. Dostupné z: <https://batterym.com/working-of-lithium-ion-battery-a-brief-introduction/>
- [11] *Tzbinfo: Lithiové akumulátory – Přehled základních typů a jejich vlastností* [online]. UETE FEKT VUT v Brně: Ing. Jiří Tichý, 2019 [cit. 2022-11-06]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektriny/13612-lithiove-akumulatory>
- [12] Deng, D. (2015), Li-ion batteries: basics, progress, and challenges. *Energy Sci Eng*, 3: 385-418.
- [13] Dragonfly Energy: A Guide To The 6 Main Types Of Lithium Batteries [online]. Reno, Nevada: Dragonfly Energy, 2021 [cit. 2022-11-07]. Dostupné z: <https://dragonflyenergy.com/types-of-lithium-batteries-guide/>
- [14] Battery University: Types of Lithium-ion [online]. [cit. 2022-11-07]. Dostupné z: <https://batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-lithium-ion>
- [15] A&S POWER: The working principle of polymer lithium battery [online]. 2021 [cit. 2022-11-18]. Dostupné z: <https://szaspower.com/company-news/The-working-principle-of-polymer-lithium-battery.html>
- [16] UNuneme: Lithium Polymer Cells Online Manufacturer [online]. [cit. 2022-11-18]. Dostupné z: https://www.lithiumpolymer-battery.com/buy-lithium_polymer_cells-page2.html

- [17] DNK: What is Lithium Polymer Battery ? [online]. [cit. 2022-11-19]. Dostupné z: <https://www.dnkpower.com/lithium-polymer-battery-guide/>
- [18] Oenergetice.cz: Průtoková baterie [online]. Tomáš Reichl, 2015 [cit. 2022-11-19]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrina/prutokova-baterie>
- [19] Hybrid.cz: Průtokové baterie před prahem singularity: část 1 [online]. Václav Diopan, 2019 [cit. 2022-11-20]. Dostupné z: <https://www.hybrid.cz/prutokove-baterie-pred-prahem-singularity-cast-1/>
- [20] ANDROID AUTHORITY: Lithium-ion vs lithium-polymer: What's the difference? [online]. Robert Triggs, 2022 [cit. 2022-11-18]. Dostupné z: <https://www.androidauthority.com/lithium-ion-vs-lithium-polymer-whats-the-difference-27608/>
- [21] European Association for Storage of Energy: Sodium Sulphur Battery [online]. [cit. 2022-11-23]. Dostupné z: https://eas-storage.eu/wp-content/uploads/2016/03/EASE_TD_NaS.pdf
- [22] Scbatteryacademy: What is the working principle of sodium-sulfur battery? [online]. 21. 1. [cit. 2022-11-23]. Dostupné z: <https://www.scbatteryacademy.com/what-is-the-working-principle-of-sodium-sulfur-battery.html>
- [23] ZHANG'S RESEARCH GROUP: Sodium Sulfur Battery [online]. Xiao Q. Chen, 2015 [cit. 2022-11-23]. Dostupné z: <https://ziang.binghamton.edu/sodium-sulfur-battery/>
- [24] Explainthatstuff: Supercapacitors [online]. Chris Woodford, 2022 [cit. 2022-11-26]. Dostupné z: <https://www.explainthatstuff.com/how-supercapacitors-work.html#:~:text=That%27s%20because%20a%20supercapacitor%20works%20by%20building%20up,compared%20in%20terms%20of%20their%20energy%20and%20power.>
- [25] SolárníNovinky.cz: Superkondenzátory: Čeští vědci vyvinuli nadějnou technologii, která může nahradit tradiční lithiové baterie [online]. 2021 [cit. 2022-11-27]. Dostupné z: <https://www.solarninovinky.cz/superkondenzarory-cesti-vedci-vyvinuli-nadejnou-technologie-ktera-muze-nahradit-tradicni-lithiove-baterie/>
- [26] Automatizace.hw.cz: Superkondenzátor – princip, vlastnosti, použití [online]. 2006 [cit. 2022-11-27]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/clanek/2006122601>
- [27] Battery University: How does a Supercapacitor Work? [online]. [cit. 2022-11-27]. Dostupné z: <https://batteryuniversity.com/article/bu-209-how-does-a-supercapacitor-work>
- [28] E. Hossain, D. Murtaugh, J. Mody, H. M. R. Faruque, M. S. Haque Sunny and N. Mohammad, "A Comprehensive Review on Second-Life Batteries: Current State, Manufacturing Considerations, Applications, Impacts, Barriers & Potential Solutions, Business Strategies, and Policies," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 73215-73252, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2917859.

- [29] *Baterie pro elektromobilitu* [online]. Tomáš Kazda [cit. 2023-01-03]. Dostupné z: https://moodle.vut.cz/pluginfile.php/524607/mod_resource/content/1/Baterie%20pro%20elektromobilitu_2022.pdf
- [30] E. Martinez-Laserna *et al.*, "Technical Viability of Battery Second Life: A Study From the Ageing Perspective," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 54, no. 3, pp. 2703-2713, May-June 2018, doi: 10.1109/TIA.2018.2801262.
- [31] *Handbook on Battery Energy Storage System*. Mandaluyong: ASIAN DEVELOPMENT BANK, 2018. ISBN 978-92-9261-470-6.
- [32] Hesse, H. C., Schimpe, M., Kucevic, D., & Jossen, A. (2017). Lithium-ion battery storage for the grid-A review of stationary battery storage system design tailored for applications in modern power grids. *Energies*, 10(12), 2107. doi:<https://doi.org/10.3390/en10122107>
- [33] *AVESCO: BATTERY ENERGY STORAGE SYSTEM COMPONENTS* [online]. [cit. 2023-04-20]. Dostupné z: <https://www.power-sonic.com/blog/battery-energy-storage-system-components/>
- [34] *The Architecture of Battery Energy Storage Systems* [online]. Pietro Tumino, 2020 [cit. 2022-12-29]. Dostupné z: <https://eepower.com/technical-articles/the-architecture-of-battery-energy-storage-systems/>
- [35] *Enel x: What is a second life battery?* [online]. [cit. 2022-12-30]. Dostupné z: <https://corporate.enelx.com/en/question-and-answers/what-is-second-life-battery>
- [36] *Battery Management System (BMS): Effective Ways to Measure State-of-Charge and State-of-Health* [online]. Andrey Solovev, 2021 [cit. 2023-03-25]. Dostupné z: <https://www.integrasources.com/blog/battery-management-system-bms-state-charge-and-state-health/>
- [37] Park, Seongyun & Ahn, Jeongho & Kang, Taewoo & Park, Sungbeak & Kim, Youngmi & Cho, Inho & Kim, Jonghoon. (2020). Review of state-of-the-art battery state estimation technologies for battery management systems of stationary energy storage systems. *Journal of Power Electronics*. 20. 10.1007/s43236-020-00122-7.
- [38] *GoSolarQuotes* [online]. 2022 [cit. 2023-04-27]. Dostupné z: <https://gosolarquotes.com.au/solar-battery-storage/>
- [39] *PowerTech: Lithium-Ion State of Charge (SoC) measurement* [online]. [cit. 2023-04-27]. Dostupné z: <https://www.powertechsystems.eu/home/tech-corner/lithium-ion-state-of-charge-soc-measurement/>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

FEKT	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
VUT	Vysoké učení technické v Brně
Li-ion	Lithium ion – Lithium iont
NiCd	Nikl-kadmium
NiFe	Nikl-železné
AgZn	Stříbro – zinkové
NiMH	Nikl-metalhydridové
NiZn	Nikl-zinkové
AgCd	Stříbro-kadmiové
LiFePO ₄	Lithium železo fosfát
LFP	Lithium železo fosfát
LMO	Lithium mangan
NMC	Lithium nikl mangan kobalt
LiNiCoAlO ₂	Lithium nikl kobalt aluminium
NCA	Lithium nikl kobalt aluminium
Li ₂ TiO ₃	Lithium titan oxid
LTO	Lithium titan oxid
NaS	Sodíkovo-sírový
BMS	Battery management system
BESS	Battery energy storage system
PCS	Power conversion system
DC	Stejnoseměrný
AC	Střídavý
EMS	Energy management system
IT	Informační Technologie
SOC	State of charge
SOT	State of temperature
SOH	State of health
EIS	Elektrochemická impedanční spektroskopie
OCV	Open circuit voltage
ESS	Energy storage systém
EIS	Elektrochemická impedanční spektroskopie

Symboly:

U	napětí	(V)
I	proud	(A)

t	teplota	(°C)
η	účinnost	(%)
t	čas	(s)
Q_n	jmenovitá kapacita	(Ah)
τ	čas	(s)
Q_C	maximální dostupná kapacita	(Ah)
R_C	aktuální vnitřní odpor	(Ω)
R_a	vnitřní odpor na konci životnosti	(Ω)
R_n	počáteční vnitřní odpor	(Ω)
ρ	hustota	(kg/m^3)
C_p	tepelná kapacita	(JK^{-1})
T	teplota	(K)
Q_{accu}	akumulované teplo	(J)
Q_{gen}	vyrobené teplo	(J)
Q_{dis}	odevzdané teplo	(J)
P_{max}	maximální výkon	(W)
P	výkon	(W)
P_d	poptávka po výkonu	(W)
U_n	jmenovité napětí	(V)
U_{max}	maximální napětí	(V)
U_{min}	minimální napětí	(V)
I_{max}	maximální proud	(A)
E	energie	(Wh)
n	počet článku dohromady	(-)
n_s	počet článků v sérii	(-)
n_p	počet článku paralelně	(-)
E_0	požadovaná velikost úložné energie	(Wh)
$Q_{N-\text{článku}}$	jmenovitá kapacita nového článku	(Ah)
$U_{N-\text{článku}}$	jmenovité napětí článku	(V)
$U_{min-\text{článku}}$	minimální napětí článku	(V)
$U_{max-\text{článku}}$	maximální napětí článku	(V)
$E_{100\%}$	úložná energie při plné kapacitě	(Wh)
$E_{85\%}$	úložná energie uložistě při poklesu kapacity	(Wh)
U_N	jmenovité napětí uložistě	(V)
U_{min}	minimální napětí uložistě	(V)
U_{max}	maximální napětí uložistě	(V)
$U_{max-\text{uložiště}}$	nepřekročitelná hodnota napětí uložistě	(V)
$Q_{100\%}$	kapacita uložistě při plné kapacitě	(Ah)
$Q_{85\%}$	kapacita uložistě v zavilosti na poklesu kapacity	(Ah)

$I_{vybíjecí}$	vybíjecí proud použitého článku	(A)
I_{max}	maximální vybíjecí proud článku	(A)
C	násobky kapacit	(-)