

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Katedra výkonové elektroniky a strojů

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Uplatnění bateriového energetického úložiště v síťových
podpůrných službách ČR

Autor práce: **Jan Klíma**
Vedoucí práce: **Ing. et Ing. Martin Vinš**

2023

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2022/2023

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Jan KLÍMA**
Osobní číslo: **E19B0139P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Téma práce: **Uplatnění bateriového energetického úložiště v síťových podpůrných službách ČR**
Zadávací katedra: **Katedra výkonové elektroniky a strojů**

Zásady pro vypracování

1. Analyzujte a popište podpůrné služby využívané v elektrizační soustavě ČR.
2. Určete potenciál pro využití bateriového energetického úložiště v těchto podpůrných službách.
3. Analyzujte a popište dostupné bateriové technologie vhodné pro energetická úložiště.
4. Navrhněte vhodnou bateriovou technologii pro specifickou případovou studii, kterou doplňte o ekonomické hodnocení.


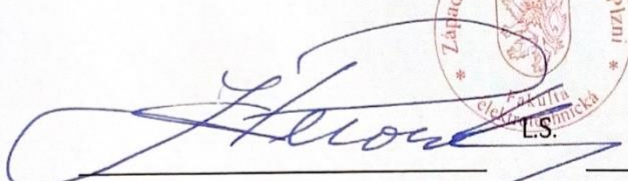
Rozsah bakalářské práce: **30 – 40**
Rozsah grafických prací: **dle doporučení vedoucího**
Forma zpracování bakalářské práce: **elektronická**

Seznam doporučené literatury:

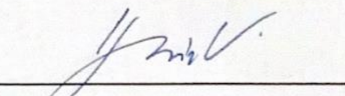
Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. et Ing. Martin Vinš**
Research and Innovation Centre for Electrical
Engineering

Datum zadání bakalářské práce: **7. října 2022**
Termín odevzdání bakalářské práce: **26. května 2023**



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



Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 7. října 2022

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce se zaměřuje na problematiku uplatnění bateriových akumulčních systémů pro síťové podpůrné služby. S rostoucím podílem obnovitelných zdrojů je problematika akumulace a optimalizace chodu elektrické sítě obtížnější než kdy předtím. K tomuto účelu mohou sloužit dnes již perspektivní bateriová úložiště, která se o oblasti elektroenergetiky a s ní spjatou akumulací uplatňují stále častěji. Nasazení bateriových systémů do podpůrných služeb může do budoucna hrát klíčový faktor v rámci udržení elektrické sítě.

Klíčová slova

Podpůrné služby, bateriový systém, elektrizační soustava, akumulace elektrické energie, energetická legislativa, akumulátory, lithiové baterie, olověné baterie, sodík sírové baterie, průtočné baterie, systémové služby.

Abstract

The present bachelor thesis focuses on the application of battery storage systems for network support services. With the increasing share of renewable energy sources, the problem of storage and optimization of power grid operation is more difficult than ever before. The nowadays promising battery storage systems, which are increasingly being applied to the field of electricity and related storage, can serve this task. The deployment of battery systems in support services can play a key role in the future in sustaining the electricity grid.

Key Words

Support services, battery system, electricity system, electricity storage, energy legislation, batteries, lithium batteries, lead acid batteries, sodium sulphur batteries, flow batteries, system services,

Poděkování

Tímto odstavcem bych chtěl poděkovat mému vedoucímu práce Ing. et. Ing. Martinovi Vinšovi za rady, odbornou pomoc a čas, který si vždy na mě našel při psaní mé práce. Mé „děkuji“ patří také Ing. Lubomírovi Kohoutovi ze spol. SUAS GROUP, s.r.o. za poznatky z praxe, a především mé rodině, přátelům a kolegům, kteří mě po celou dobu psaní podporovali.

Obsah

Úvod	- 11 -
1 Električní soustava ČR.....	- 12 -
2 Kodex PS a systémové služby	- 13 -
2.1 Kodex PS	- 13 -
2.2 Systémové služby	- 14 -
3 Podpůrné služby	- 16 -
3.1 Rozdělení služeb.....	- 17 -
3.2 Služby výkonové rovnováhy	- 18 -
3.2.1 Zálohy pro automatickou regulaci frekvence (FCR).....	- 18 -
3.2.2 Zálohy pro regulaci výkonové rovnováhy s automatickou aktivací (aFRR)	- 19 -
3.2.3 Zálohy pro regulaci výkonové rovnováhy s manuální aktivací (mFRR).....	- 20 -
3.2.4 Zálohy pro regulaci s manuální aktivací do 5 minut (mFRR ₅).....	- 20 -
3.2.5 Zálohy pro náhradu (RR).....	- 21 -
3.3 Ostatní podpůrné služby	- 21 -
3.4 Sekundární regulace U/Q (SRUQ)	- 21 -
3.5 Ostrovní provoz (OP)	- 22 -
3.6 Schopnost startu ze tmy (BS)	- 23 -
4 Bateriové systémy pro skladování elektrické energie (BESS)	- 24 -
4.1 Parametry úložišť.....	- 24 -
4.2 Faktory ovlivňující baterie.....	- 26 -
4.3 Bateriové technologie	- 27 -
4.3.1 Olověné baterie (Pb).....	- 27 -
4.3.2 Lithiové baterie.....	- 29 -
4.3.3 Sodíkovo-sírové baterie (NaS).....	- 30 -
4.3.4 Vanadium redoxní průtočná baterie (VRB).....	- 31 -
4.4 Porovnání baterií.....	- 32 -
4.5 Bateriové úložiště obecně.....	- 35 -
4.6 Trendy v oblasti bateriových systémů.....	- 36 -
4.7 Legislativní rámec akumulace v České republice	- 36 -
4.8 Potenciál nasazení bateriových systémů.....	- 38 -
4.8.1 Podpora primárních zdrojů, poskytování SVR.....	- 38 -

4.8.2	Obnovitelné zdroje.....	- 40 -
4.8.3	Využití u průmyslových podniků	- 41 -
4.8.4	Obchod s elektrickou energií	- 42 -
4.8.5	SWOT analýza.....	- 43 -
5	Případová studie	- 44 -
5.1	Analýza dat	- 44 -
5.2	Návrh vhodné technologie.....	- 48 -
5.3	Průběh stavu baterie.....	- 49 -
5.4	Předpoklady pro návrh.....	- 51 -
5.5	Ekonomické hledisko	- 52 -
5.6	Zhodnocení	- 53 -
	Závěr.....	I
	Přílohy	I

Seznam symbolů a zkratek

AB	Agregační blok
aFRR	Záloha pro regulaci výkonové rovnováhy s automatickou aktivací
AGM	Absorpční skleněné rouno
BESS	Bateriový systém pro akumulaci elektrické energie
BMS	Battery Managment System
BS	Schopnost startu ze tmy
ČR	Česká republika
DK	Dlouhodobý kontrakt
DoD	Hloubka vybití
DS	Distribuční soustava
DT	Denní trh
ENTSO-E	Evropská síť provozovatelů přenosových soustav
ERÚ	Energetický regulační úřad
ES	Elektrizační soustava
FAT	Doba plného náběhu
FCR	Záloha pro automatickou regulaci frekvence
FRR	Zálohy pro regulaci výkonové rovnováhy
FVE	Fotovoltaická elektrárna
LFP	Lithium železo fosfátová
Li-Ion	Lithium iontová
mFRR	Záloha pro regulaci výkonové rovnováhy s manuální aktivací
mFRR5 pět minut	Záloha pro regulaci výkonové rovnováhy s manuální aktivací do minutové zálohy
MZt	Minutové zálohy
NaS	Sodík-sírová
Ni-Cd	Nikl-kadmiová
Ni-MH	Nikl-metal hydridový
OP	Schopnost ostrovního provozu
OZ	Obnovitelné zdroje
Pb	Olovo
PPDS	Pravidla pro provozování distribuční soustavy
PpS	Podpůrné služby
PR	Primární regulace
PřS	Přenosové služby
PS	Přenosová soustava
PSB	Polysulfid-bromové baterie
RE	Regulační energie
RFB	Průtočné baterie
RFB	Průtočné baterie
RR	Záloha pro náhradu
SoC	Stav nabití
SoH	Status života

SR	Sekundární regulace
SRUQ	Sekundární regulace U/Q
SV30	Snížení výkonu
SVR	Služby výkonové rovnováhy
SyS	Systémové služby
VRB	Vanadium redoxní průtočné baterie
VRFB	Vanadium redoxní průtočné baterie
VTE	Větrné elektrárny
VVP	Vnitřní výnosové procento

Δf	odchylka kmitočtu od zadané hodnoty	(Hz)
f_n	jmenovitá hodnota frekvence v síti	(Hz)
P	Činný výkon	(W)
P_0	Výkon bloku	(MW)
P_{id}	Závislost výkonu turbíny	(MW)
P_n	Nominální výkon bloku	(MW)
Q	Jalový výkon	(Var)
S	Statika proporcionálního regulátoru	(%)

Úvod

V dnešní době, kdy energetika stále více spoléhá na obnovitelné zdroje díky pravidlům a nařízením Evropské unie, se problematika efektivní akumulace elektrické energie stává stále aktuálnější. Změny v energetickém sektoru, jako je prosazování elektromobilů nebo rapidně rostoucí instalovaný výkon obnovitelných zdrojů, vyžadují komplexní řešení pro efektivní skladování elektrické energie. V tomto kontextu se nabízí právě bateriová úložiště pro potenciální využití pro síťové podpůrné služby, jež mají za cíl udržet provozu schopnou energetickou síť.

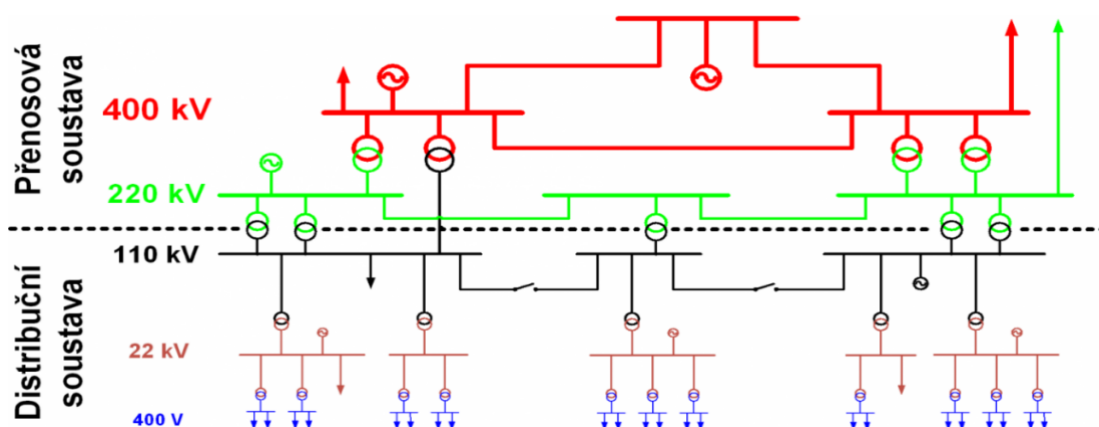
Bateriová úložiště jsou prostředkem pro uchovávání energie získané z různých zdrojů energie, jako jsou fotovoltaické nebo větrné elektrárny, umožňující její pozdější využití v době největší potřeby a poptávky. To přináší značné výhody v oblasti fluktuací výroby elektřiny a optimalizace spotřeby energie v síti.

Cílem bakalářské práce je nejprve prozkoumat podpůrné služby a dostupné bateriové technologie, které na základě svých vlastností a parametrů jsou schopny práce v podpůrných službách ve prospěch sítě. Dále se práce zaměřuje na konkrétní potenciální využití v těchto podpůrných službách.

Pro dosažení cílů práce budou provedeny rešerše zabírající se právě bateriovými technologiemi a podpůrnými službami. Dále bude provedena simulace konkrétní bateriové technologie na základě dostupných dat. Z výsledků simulace bude výsledná technologie adekvátně ekonomicky ohodnocena. Výsledky práce by mohly přinést poznatky pro řady výzkumníků a energetické firmy, které se věnují této problematice.

1 Elektrizace ČR

Elektrická energie je výhodná, protože její druh je transformovatelný na jiný druh jako je tepelná, nebo mechanická energie. Aby byly uspokojeny lidské potřeby, musí se elektrická energie vhodným způsobem transformovat a přenést. K účelům přenosu, distribuce, výroby a užití elektrické energie je určena elektrizační soustava (ES), která je na území Evropy synchronně propojena s dalšími soustavami. Zjednodušené schéma ES je možno vidět na Obr. 1, ze kterého vyplývá, že ES je rozdělena na další dvě soustavy, jde o soustavu přenosovou (PS) a distribuční (DS).



Obr. 1: Schéma ES [1]

PS a DS tvoří kostru celého oběhu s elektrickou energií, od výroby (velké systémové elektrárny) až ke koncové spotřebě (domácnosti, podniky). PS je v ČR provozována na napěťových hladinách 400, 220 a z části 110 kV. Spojení těchto hladin zajišťuje jeden z nejdůležitějších elektrických strojů na poli elektroenergetiky – transformátor. Úkolem pro PS je přenos vysokých výkonů na poměrně velké vzdálenosti (stovky km), také vyvádí výkony z elektráren a jsou do ní připojeny i zahraniční elektrizační sítě. DS je síť primárně určená k distribuci elektrické energie na místo spotřeby. Ovšem toto není nutnou podmínkou, koncoví uživatelé také mohou elektřinu dodávat. Pro DS je charakteristické napětí o nižších napěťových hladinách. Jde zejména o napěťové hladiny 110 kV, 35 kV, 22 kV, 500 V a 400 V. Aby bylo možné dostat velké množství energie v požadované kvalitě a čase ke koncovým odběrným místům, musí se o PS starat tzv. provozovatel. Provozovatel PS zajišťuje, aby elektrická energie byla ke koncovým spotřebitelům dodána v požadovaném čase, množství, místě a v určité kvalitě. Provozovatelem české PS je akciová společnost ČEPS. [2], [3]

2 Kodex PS a systémové služby

Jak již bylo zmíněno, provozovatelem české PS je ČEPS, a.s., jehož povinností je zachovat stabilitu PS. Pro zajištění stabilního chodu sítě slouží systémové (SyS) a podpůrné služby (PpS). PpS musí mít k dispozici regulační výkon a jelikož ČEPS nesmí vlastnit žádné vlastní zdroje pro výrobu energie, musí si je tedy obstarávat pomocí dohodnutých smluv s jednotlivými výrobny elektrické energie. Poskytování služeb je založeno na principech nákupu pomocí výběrového řízení, přímé smlouvy s ČEPS, ale také pomocí obchodování na trzích. Subjekt, jenž chce poskytovat PpS a zároveň má provozuschopnou a certifikovanou jednotku, musí splnit povinnosti týkajících se Dohody o poskytování PpS. [4]

Prostředky pro zachování stability PS jsou veřejně dostupné v Kodexu PS na webových stránkách provozovatele.

2.1 Kodex PS

Kodex PS je legislativní dokument obsahující osm částí. Cílem dokumentu je informovat účastníky trhu s elektřinou o pravidlech, která stanovují:

- Minimální technické, konstrukční a provozní požadavky pro připojení a užívání PS,
- podmínky pro poskytování PpS a přenosových služeb (PřS). [3]

Tab. 1: Jednotlivé části Kodexu PS

Kodex PS	Název	Platnost od
Část I	Základní podmínky pro užívání PS	5. 12. 2022
Část II	Podpůrné služby	12. 9. 2022
Část III	Poskytování systémových a podpůrných služeb	29. 11. 2022
Část IV	Plánování rozvoje PS	5. 12. 2022
Část V	Bezpečnost provozu a kvalita na úrovni PS	27. 7. 2022
Část VI	Dispečerské řízení	11. 8. 2022
Část VII	Zařízení PS	11. 8. 2021
Část VIII	Standardy PS	1. 5. 2015

Dokument je vázán legislativou, tím pádem dochází k jeho aktualizacím. Poslední aktualizace proběhly v posledním čtvrtletí roku 2022 (viz Tab. 1). [3]

2.2 Systémové služby

SyS jsou dle kodexu [5] definovány jako: „*Systémové služby jsou činnosti ČEPS, kterými zajišťuje kvalitu a spolehlivost dodávky elektřiny na úrovni přenosové soustavy (PS) a plnění mezinárodních závazků a podmínek propojení elektrizační soustavy (ES) ČR.*“ Kvalita elektrické energie je dána v tomto případě hodnotou jmenovité frekvence v síti a jmenovitou hodnotou napětí. Hodnoty jsou dále definovány v Kodexu PS. Spolehlivost nebo také nepřetržitost dodávky energie v odběrných místech z PS je definována jako průměrný počet a trvání jednotlivých výpadků v předacích místech. SyS rovněž zajišťují provozní požadavky ES ČR vyplývající z mezinárodní spolupráce v rámci ENTSO-E a také z legislativy Evropské unie. Evropská síť provozovatelů přenosových soustav elektřiny, známá spíše pod zkratkou **ENTSO-E** (z angl. European Network of Transmission System Operators for Electricity), je sdružení evropských provozovatelů elektrických přenosových soustav, kteří na základě vzájemné dohody udržují obchod s elektřinou. Nyní má asociace 39 členů ze 35 zemí. [6], [7], [8]

Primárním úkolem SyS je udržování výkonové bilance mezi výrobou a spotřebou elektrické energie, při neudržování rovnováhy by docházelo k nestabilitě sítě, v důsledku, čeho by docházelo k odchylce frekvence a v krajním případě by došlo až k rozpadu sítě. Následující SyS, které zajišťuje ČEPS a jsou uvedeny v Kodexu PS, část I. [5]

- Udržování kvality elektřiny
 - Sledování kvality napěťové sinusovky,
 - sekundární regulace napětí pomocí služby Sekundární regulace U/Q,
 - zálohy pro automatickou regulaci frekvence,
 - proces obnovení frekvence.
- Udržování výkonové rovnováhy v reálném čase
 - Zajištění pomocí službou výkonové rovnováhy, konkrétně zálohou pro regulaci výkonové rovnováhy s automatickou aktivací,
 - službou výkonové rovnováhy pomocí zálohy pro regulaci výkonové rovnováhy s manuální aktivací a také zálohou pro náhradu.
- Obnovení provozu
 - Plán obnovy se schopností startu ze tmy a ostrovního provozu.

- Dispečerské řízení
 - Tok činných výkonů,
 - bezpečnost provozu,
 - řešení poruchových stavů a případné obnovení provozu sítě.

3 Podpůrné služby

Podpůrné služby (PpS) jsou dle ČEPS, a.s. definovány jako: „*Prostředky pro zajištění systémových služeb (SyS). Jsou definovány jako činnosti fyzických nebo právnických osob pro zajištění provozování elektrizační soustavy a pro zajištění kvality a spolehlivosti dodávky elektřiny. Pomocí PpS je možno korigovat rozdíly mezi odběrem a výrobou, a to změnami spotřeby či výkonů výroby.*“ [9]

PpS může poskytovat jakýkoli účastník trhu s vlastní jednotkou, která splňuje všechny podmínky stanovené Kodexem PS část II – „*Podpůrné služby*“. Aby mohl poskytovatel služby poskytnout svou zálohu, a tím pádem profitovat z její aktivace, musí být vybrán, nejčastěji se jedná o výběrové řízení. V případě neúspěchu může nabídnout svou zálohu na denním trhu s PpS. [1], [4]

Poskytovatelé PpS na základě smluv garantují ČEPS přesnou hodnotu odběru nebo dodávky energie. Produkt, který vzniká při aktivaci PpS se nazývá regulační energie (RE). Regulační energií se pokrývá systémová odchylka, která vzniká při nerovnováze v síti a je dražší než cena silové elektřiny, proto se dodavatelé energie snaží vždy co nejlépe odhadnout spotřebu elektřiny, aby k aktivaci PpS nemuselo dojít. V případě poskytování FCR je RE zdarma, to v případě ostatních SVR neplatí. Při poskytování SVR jsou vyplaceny ceny za rezervaci výkonu.

Tab. 2: Ceny SVR při dlouhodobém kontraktu [10]

Záloha	Cena
FCR	1 616,2
aFRR+	3611,95
aFRR-	501,66
mFRR+	1590,13
mFRR-	211,4
mFRR ₅	1550,76

V kapitole 3 bude psáno o době plné aktivace, to je doba, do které blok musí poskytnout požadovanou změnu výkonu. Skládá se z doby přípravy a doby tzv. „*rampování*“. Doba plného náběhu, resp. aktivace se také uvádí jako zkratka **FAT** (z angl. výrazu **F**ull **A**ctivation **T**ime).

3.1 Rozdělení služeb

V rámci spolupráce synchronně propojených soustav (*ENTSO-E*) dochází k vzájemnému propojování soustav s okolními státy. Tím je Kodex PS aktualizován a díky tomu dochází postupem času k jednotlivým změnám (např. k přejmenování PpS a změnou časů poskytování jednotlivých služeb). Dříve byly služby známé pod názvy primární, sekundární a terciární regulace, to již nyní neplatí. Kodex PS byl aktualizován v dubnu 2019 a díky tomu se názvy služeb změnila následovně:

- Primární regulace (PR) = Zálohy pro automatickou regulaci frekvence (FCR)
- Sekundární regulace (SR) = Zálohy pro regulaci výkonové rovnováhy s **automatickou aktivací** (aFRR)
- Minutové zálohy (MZ_t) = Zálohy pro regulaci výkonové rovnováhy s **manuální aktivací** do t minut (mFRR_t)
- Snížení výkonu (SV30) = Zálohy pro náhradu (RR)

V ideálním případě by v ES měla být rovnováha činných výkonů (P), tento výkon je spojen s řízením kmitočtu v síti. Jalovým výkonem (Q) reguluje v síti kvalitu napětí, proto nynější rozdělení PpS se skládá ze dvou následujících kategorií založených na regulaci pomocí P a Q.

- Služby výkonové rovnováhy (**SVR**),
- ostatní podpůrné služby (tzv. **Nefrekvenční služby**),

přičemž **SVR** jsou využívány k **zajištění rovnováhy** mezi výrobou a spotřebou a **ostatní PpS** se používají k **zajištění kvality napětí** a bezproblémového chodu PS.

Do kategorie SVR spadají služby:

- Zálohy pro automatickou regulaci frekvence (**FCR**)
- Zálohy pro regulaci výkonové rovnováhy s automatickou aktivací (**aFRR**)
- Zálohy pro regulaci výkonové rovnováhy s manuální aktivací (**mFRR_t**)
- Zálohy pro regulaci výkonové rovnováhy s manuální aktivací do 5 minut (**mFRR5**)
- Zálohy pro náhradu (**RR**)

V kategorii nefrekvenčních podpůrných služeb jsou poté obsaženy služby:

- Sekundární regulaci U/Q (**SRUQ**)
- Ostrovní provoz (**OP**)
- Start ze tmy (**BS**)

Dle kodexu [4] musí všechny výše uvedené služby splňovat pět podmínek:

- Měřitelnost – provádí se stanovenými parametry a způsobem měření,
- garantování dostupnosti služby – může být vyžádána inspekce,
- certifikovatelnost – stanovení testů pro schopnost poskytnout službu,
- možnost průběžné kontroly poskytování,
- v případě poskytování SRUQ se jedná o zařízení připojená do PS.

3.2 Služby výkonové rovnováhy

Jak již z názvu vyplývá, SVR mají za úkol udržet výkonovou bilanci mezi výrobou a spotřebou. Reguluje se dodávaný P do sítě a díky tomu dochází k vyrovnávání frekvence v síti. K tomu, aby byl úkol splněn, jsou využívány tyto služby: FCR, mFRR_i, aFRR, mFRR₅, které budou popsány v podkapitolách níže. [4]

3.2.1 Zálohy pro automatickou regulaci frekvence (FCR)

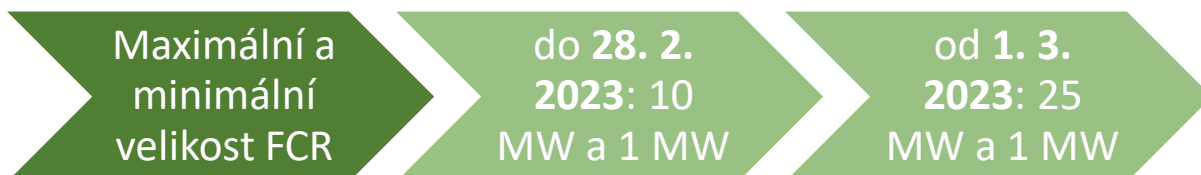
Jedná se o místní automatickou funkci, která nahradila dřívější pojmenování „*Primární regulace*“. Proces automatické regulace frekvence, též známý pod zkratkou FCR (z angl. *Frequency Containment Reserve*) je jedna ze služeb, která je dle kodexu[4] definována jako: „*Zálohy pro automatickou regulaci frekvence FCR jsou lokální automatickou funkcí, spočívající v přesně definované změně výkonu jednotky v závislosti na odchylce frekvence od zadané hodnoty. Změnu výkonu jednotky, která je realizovaná pomocí proporcionálního regulátoru (korektoru frekvence) v závislosti na odchylce frekvence*“. FCR má snahu udržet v síti ideálně jmenovitou hodnotu kmitočtu sítě (50 Hz), pokud by frekvence kolísala, docházelo by k výpadkům a dodávaná energie by neměla požadovanou kvalitu. Frekvence v síti se řídí pomocí činného výkonu, následující vzorec pojednává právě o změně výkonu, který je požadován po službě (resp. po proporcionálním regulátoru, který zajišťuje změnu činného výkonu [4]:

$$\Delta P_{KORf} = -\frac{100}{S} \cdot \frac{P_n}{f_n} \cdot \Delta f, \quad (1)$$

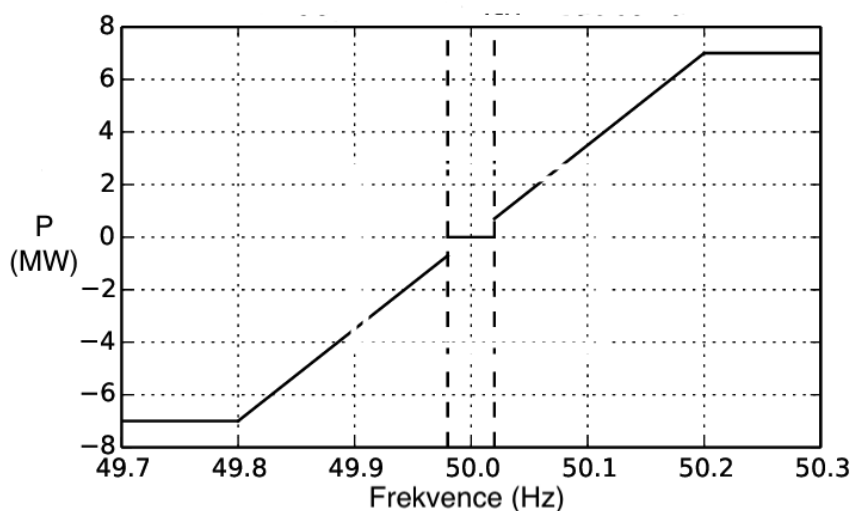
kde „ ΔP_{KORf} je požadovaná změna výkonu jednotky (resp. příspěvek FCR) (MW), P_n je nominální výkon jednotky (MW), Δf je odchylka od zadané hodnoty (Hz), S je statika korektoru frekvence (MW/Hz), f_n je jmenovitá hodnota frekvence v síti (50 Hz).“ [4]

Poskytovatel služby je na své jednotce povinný uvolnit veškerou velikost zálohy do 30 s od vzniku odchylky a do 15 s musí zajistit polovinu rezervované velikosti FCR. Při změně frekvence o 200 mHz (od požadované hodnoty) je uvolněna maximální rezervovaná velikost

FCR. Maximální velikost výkonu vykupované FCR pro jednu jednotku je nyní stanovena na 25 MW, naopak minimální velikost výkonu je 1 MW. Tyto hodnoty jsou platné od 1. 3. 2023. [4]



Obr. 2: Vývoj velikosti výkonu pro FCR

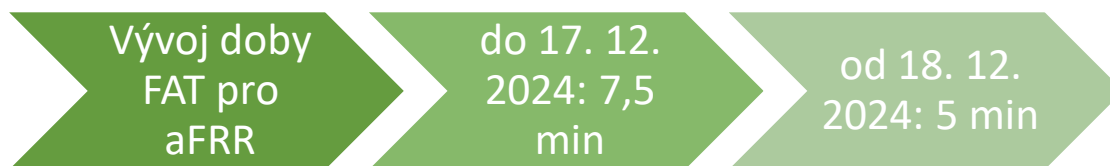


Obr. 3: Příklad statiky FCR [11]

3.2.2 Zálohy pro regulaci výkonové rovnováhy s automatickou aktivací (aFRR)

Tento typ zálohy spadá do rodiny záloh pro regulaci výkonové rovnováhy (FRR – z angl. Frequency Restoration Reserve). Tato PpS je dle čeps.cz [9] definována jako: „aFRR je zprostředkována pomocí změny výkonu regulované jednotky, tak jak je požadováno z Dispečinku ČEPS regulátorem frekvence a salda předávaných výkonů“. Úkolem této služby je udržet jmenovitou hodnotu frekvence a salda předávaných výkonů s ostatními systémy udržet na smluvené hodnotě. Záloha může být dle znaménkové konvence záporná (aFRR-) nebo kladná (aFRR+) – zálohy jsou obstarávány zvlášť. Minimální výkon

na jednotce pro tuto konkrétní službu je 1 MW a maximální výkon je 99 MW. Minimální rychlost změny činného výkonu na sledované jednotce je určena podílem aktivované zálohy aFRR ku době plné aktivace – aFRR/FAT (MW/MIN).[4]



Obr. 4: Budoucí vývoj doby plného náběhu pro aFRR

S návazností na Obr. 4 bude zkrácení FAR aFRR na 5 minut zavedeno nejpozději od poloviny prosince roku 2024. [4]

3.2.3 Zálohy pro regulaci výkonové rovnováhy s manuální aktivací (mFRR)

Záloha pro regulaci výkonové rovnováhy, zkráceně mFRR pochází z anglického spojení slov **m**anual **F**requency **R**estoration **R**eserve. Dle kodexu [4] je definována jako: „Standardní produkt záloh pro regulaci výkonové rovnováhy s manuální aktivací definovaný podle Nařízení Komise (EU) 2017/2195 (EBGL)“. Tyto zálohy poskytují jednotlivé bloky zapojené do sítě, při přijetí povelu od Dispečinku ČEPS musí změnit svou hodnotu výkonu, a to na základě znaménkové konvence (záporně/kladně). Z toho lze usoudit, že zálohu je možno provozovat jako asymetrickou, kladná (mFRR+) a také záporná (mFRR-). Minimální množství výkonu, který může poskytnout jeden blok, je 1 MW. Také existuje omezení pro maximální výkon, to je v případě této zálohy 99 MW. S maximálním FAT 12,5 minuty. [4]

3.2.4 Zálohy pro regulaci s manuální aktivací do 5 minut (mFRR₅)

Službu mFRR₅ poskytují jednotlivé bloky připojené do ES tím, že na pokyn od dispečinku ČEPS změni svůj výkon. Celý výkon zálohy musí být blok schopen poskytnout do maximálně 5 minut od pokynu. Minimální velikost zálohy je 1 MW, to platí pouze pro jeden blok/jednotku. Naopak, maximální množství není nikde blíže specifikováno, celková velikost je uvedena pouze v konkrétní smluvní dohodě mezi ČEPS a poskytovatelem služby. Minimální doba aktivace služby za jeden den poskytování zálohy jsou celé čtyři hodiny. [4]

3.2.5 Zálohy pro náhradu (RR)

Jako poslední zálohu spadající do kategorie SVR je záloha pro náhradu (RR), která je zkratkou z angl. spojení „*Restoration Reserve*“. Základní myšlenkou pro RR je poskytnutí buďto kladné (RR+) nebo záporné (RR-) zálohy na svorkách sledované jednotky. RE od RR (+) nebo RR (-) musí být jednotkou uvolněna do 30 minut od příkazu dispečera. Kodex dále definuje maximální a minimální velikost služby na hranici jednoho bloku a to na 1 MW a 99 MW. Poskytovatel služby může aktivovat zálohu na pevnou čtvrt hodinu nebo její násobek, maximálně však 60 minut. [4]

Tab. 3: Přehled jednotlivých služeb, výkonů a FAT

Typ zálohy	Maximální množství jednotky (MW)	Minimální množství jednotky (MW)	Doba plné aktivace (FAT)
FCR	25	1	15 s (50 %), 30 s (100 %)
aFRR	99	1	7,5 min
mFRR	99	1	12,5 min
mFRR5	určuje si sám ČEPS, a.s.	1	5 min
RR	99	1	30 min

Pro přehlednost byly vyňaty důležité hodnoty od všech výše popsaných záloh. Hodnoty jsou aktuální do doby, než se Kodex PS a s ním svázaná legislativa změní.

3.3 Ostatní podpůrné služby

Kategorie ostatní služby výkonové rovnováhy obsahuje služby: Sekundární regulace U/Q (SRUQ), ostrovní provoz (OP), start ze tmy (BS). Proč spadají do kategorie *ostatní*? Oproti první kategorii tyto níže zmíněné služby mají za cíl udržet v síti co nejkvalitnější efektivní hodnotu napětí, a tudíž jejich funkce závisí na rovnováze jalových výkonů v síti, kterou se vyrovnává kvalita hodnoty napětí. V případě služby sekundární regulace U/Q se napětí řídí pomocí jalového výkonu, to je také možné ihned vědět z názvu. [4], [5]

3.4 Sekundární regulace U/Q (SRUQ)

Napětí se v síti řídí pomocí jalového výkonu. Této schopnosti využívá i služba sekundární regulace U/Q, známá také pod zkratkou SRUQ. Jedná se o automatickou funkci, která využívá předem smluvně dohodnutý jalový výkon pro udržení požadované hodnoty napětí především v pilotních uzlech ES. Pilotní uzel v ES se nachází v podobě rozvodny PS,

ve které se udržuje sekundární regulací požadované napětí. Druhá funkcionalita SRUQ spočívá v rozdělení jalového výkonu na jednotlivé stroje v síti. [4]

Sekundární regulace musí být schopna spolupracovat s prostředky terciární regulace jalových výkonů a napětí a zároveň pro celý proces jsou definovány podmínky:

- Aperiodický přechodný děj, maximálně s jedním překmitem,
- celý děj ukončený do 2 minut.

3.5 Ostrovní provoz (OP)

Schopnost ostrovního provozu znamená schopnost provozu jednotky (resp. bloku) do vydělené části sítě, takzvaného *ostrova*. Schopnost OP s sebou přináší vysoké nároky na regulaci systémových veličin (kmitočet, napětí). Souvisí s tím, že zařízení pracuje do izolované části vydělené soustavy, automaticky přechází na OP při odchylce kmitočtu o ± 200 Hz. To znamená, že přechází do režimu regulace při snížení jmenovité hodnoty frekvence po 49,8 Hz a zvýšení hodnoty kmitočtu nad 50,2 Hz. Zatížení ostrova je velmi proměnné a nese s sebou velké změny napětí a kmitočtu, které musí být jednotka schopna vyřešit svojí regulací. [4]

Stav nouze je stav, kdy se ES rozpadá a pro jeho následné řešení je nezbytná schopnost OP. Postupy na obnovu a obranu ES obsahuje článek 4 odst. 4 nařízení (EU) č. 2017/2196. Poskytovatel, který chce službu poskytovat, musí vlastnit jednotku, která splňuje požadavky, které jsou obsažené v Kodexu PS, a to včetně smluv s provozovatelem distribuční soustavy. [4]:

- Přechod do OP.
- Samotný ostrovní provoz.
- Opětovné připojení k soustavě.
- Dostupnost sužby.

Bloková regulace při přechodu na ostrovní provoz musí být schopna zajistit stabilní paralelní spolupráci s ostatními zařízeními ve společném ostrovu a také přiměřenou odezvu dodávaného činného (P) a jalového (Q) výkonu na změny napětí a kmitočtu. Adekvátní odezvou rozumíme ideální závislost výkonu turbíny (P_{id}) na stálé odchylce frekvence Δf :

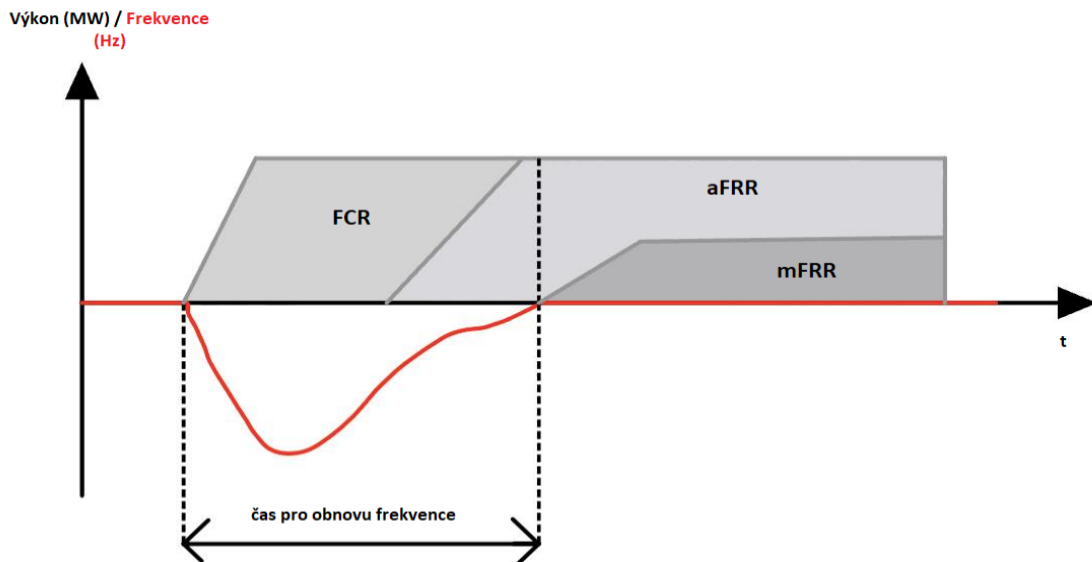
$$\Delta P_{id} = P_0 - \frac{100}{S} \cdot \frac{P_n}{f_n} \cdot \Delta f, \quad (2)$$

kde S je statika proporcionálního regulátoru (4-8 %), P_0 je výkon bloku před přechodem do OP (MW), f_n je jmenovitý kmitočet sítě (Hz), P_n je nominální výkon jednoty (MW), Δf je odchylka od zadané hodnoty (Hz).

3.6 Schopnost startu ze tmy (BS)

Služba s názvem schopnost startu ze tmy, taktéž označována zkratkou BS, která v sobě skrývá anglické spojení *black start*. Jde o schopnost bloku najet na své jmenovité otáčky, a to bez pomoci dalšího vnějšího zdroje, dosáhnout jmenovitého napětí, připojení k síti a dále tuto síť napájet v ostrovním režimu. Služba je nezbytná pro obnovení dodávky elektrické energie po rozpadu sítě, ať částečném nebo úplném. Pokud dojde k rozpadu sítě, existují priority seřazené od nejdůležitějších prvků ES, které se obnovují jako první. Tyto priority jsou uvedeny v Kodexu PS část V. A jsou jimi [12]:

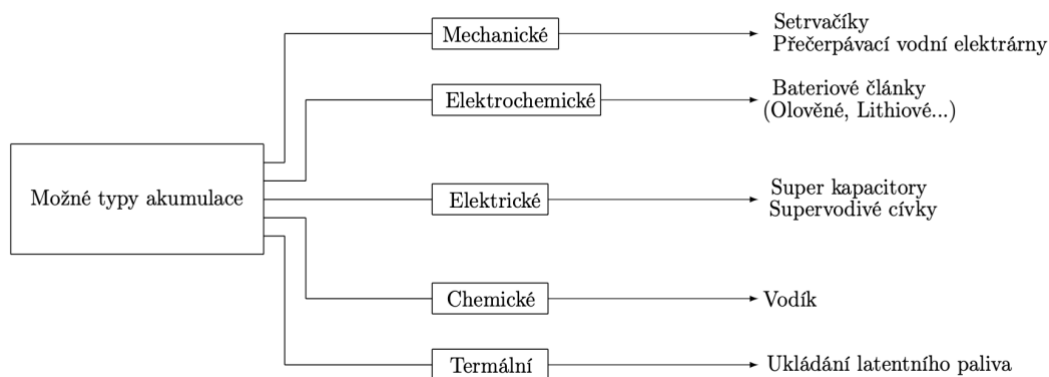
- Vlastní spotřeba jaderných elektráren,
- vlastní spotřeba systémových (velkých klasických) elektráren,
- hlavní město Praha,
- velké městské aglomerace,
- ostatní spotřebitelé.



Obr. 5: Postupné nasazování služeb při odchylce frekvence [13]

4 Bateriové systémy pro skladování elektrické energie (BESS)

Současnost nabízí širokou škálu možností pro akumulaci elektrické energie viz Obr. 6. energii lze akumulovat pomocí stlačeného vzduchu, potenciální energie vody, kinetické energie uloženou v točící se masě žele (setrvačníky) a v neposlední řadě také s pomocí akumulátorových článků baterií. Akumulace pomocí bateriových článků má za poslední roky rozmach nejen u nás, ale i po celém světě. To naznačuje jistý potenciál v této oblasti akumulace. [14]



Obr. 6: Možnosti akumulace elektrické energie [14]

Bateriové systémy (BESS) využívající tyto články se dnes na poli elektroenergetiky uplatňují stále častěji, může za to jejich velmi rychlá možnost výstavby, která se pohybuje v řádech měsíců až jednoho roku. Negativum, které zpožďuje výstavbu celého systému, je čekací doba na jednotlivé komponenty. Dnes se jedná zejména o transformátory a vysokonapěťové rozvaděče, čekací lhůta na výše zmíněné komponenty se pohybuje v řádech měsíců. Mezi nesporné výhody BESS také patří jejich skoro okamžitá reakce na požadavek sítě (resp. na dodávky výkonu). Jedná se o reakci v řádech milisekund. Což je oproti konvenčním přečerpávacím elektrárnám znatelně kratší. Další výhodou BESS spočívá v rozmanitosti staveb, stavba úložiště může být provedena skoro kdekoli, například i na pouštích. Dle návrhu úložiště lze zajistit dodávku výkonu trvající až desítky hodin. [14]

4.1 Parametry úložišť

Tato podkapitola se bude zabývat parametry bateriových článků pro úložiště. Parametry jsou pro různé technologie velmi rozmanité a každá umožňuje jinou variaci parametrů.

- **Kapacita (Wh)**

Každý obecný akumulátor disponuje schopností akumulace energie. U akumulátorů se tedy setkáváme s pojmem kapacita. Kapacita baterie je jedním z nejdůležitějších parametrů. Jedná se o celkové množství energie, které lze v baterii uchovat. Často výrobci udávají jednotku Wh (pro velké BSAE se spíše uvažuje MWh), ale výrobci využívají také jednotku Ah. Tyto hodnoty udávají dodaný výkon, resp. proud za jednotku času (hodinu). [15]

- **Rychlost nabíjení a vybíjení – C-rate**

Rychlost nabíjení a vybíjení je charakteristickou veličinou pro baterie. Pro určení těchto veličin se zavádí poměrná jednotka, tzv. „C-rate“. V podstatě určuje poměr mezi nabíjecím a vybíjecím proudem (výkonem). Určuje se písmenem C a číslem. Při přepočtu větší číslo znamená větší proud, který je baterie schopna dodat, menší C značí pravý opak. Obecně se C-rate pohybuje od 0,1 do 6. [15]

- **Stav života (SoH – State of Health)**

State of Health, zkráceně také SoH je procentní hodnota značící poměr *momentální kapacity* článku ku kapacitě definované výrobcem. Nový článek by měl dosahovat SoH = 100 %. [15]

- **Životnost (počet cyklů, rok)**

Baterie mají omezenou životnost. Parametr, který určuje, jak dlouho bude schopna udržet svou danou kapacitu se jmenuje životnost a udává se buďto jako cyklická životnost nebo životnost kalendářní. U BESS se ještě využívá tzv. „kombinovaná životnost“, která je kombinací předchozích dvou pojmů. Často se uvádí jako počet cyklů nebo počet let, dle toho, co nastane dříve. [15]

- **Energetická hustota (Wh/l, Wh/kg)**

Tento parametr určuje podíl energie, kterou je baterie schopna pojmout na svou jednotku objemu. Obecně platí, čím více energie baterie pojme, tím je baterie větší. Pro velké bateriové úložiště, kde nejsme omezeni prostorem, nehraje parametr zásadní roli. [15]

- **Účinnost (%)**

Účinnost neboli efektivita baterie je procentní údaj, určující, jakou část energie je baterie schopna dodat během vybíjení a jaká část energie se přemění díky fyzikálním zákonům na teplo. [15]

- **Samovybíjení (%)**

Tento stav je přirozenou a také nežádoucí součástí elektrochemické baterie. V podstatě jde o vybíjení článku i bez zapojení zátěže. Pokud baterii necháme dlouhou dobu uloženou,

dochází ke snížení napětí článku, nárustu jejího vnitřního odporu a tím dojde i k poklesu životnosti článku. [15]

4.2 Faktory ovlivňující baterie

Definovaná životnost baterie výrobcem se vztahuje ke splnění určitých provozních podmínek a jsou jimi:

- **Pracovní a skladovací teplota (°C)**

V elektrochemickém článku platí úměra mezi pracovní teplotou a chemickými reakcemi. Pokud bude teplota článku vyšší bude i průběh chemických reakcí lepší, to umožňuje lepší využití baterie. Ovšem zvýšená teplota má negativní vliv na degradaci baterie a zvýšení samovybíjení. Proto není vhodné doporučenou teplotu dlouhodobě překračovat. V případě lithiových článků je jejich pracovní teplota 15 až 30 °C, pokud bude baterie namáhána, povede to ke zvýšení teploty a je nutno zvážit chlazení. Řešením může být využití vysokoteplotních sodík–sírových baterií, jejichž pracovní teplota se pohybuje až do 350 °C. [15]

V případě skladování baterií se pro zachování článků musí dodržet skladovací teplota. Vyšší teploty pro baterie znamenají ztrátovost uložené energie (baterie se skladují nabitě). Obecně se skladovací teplota rozumí jako pokojová. [15]

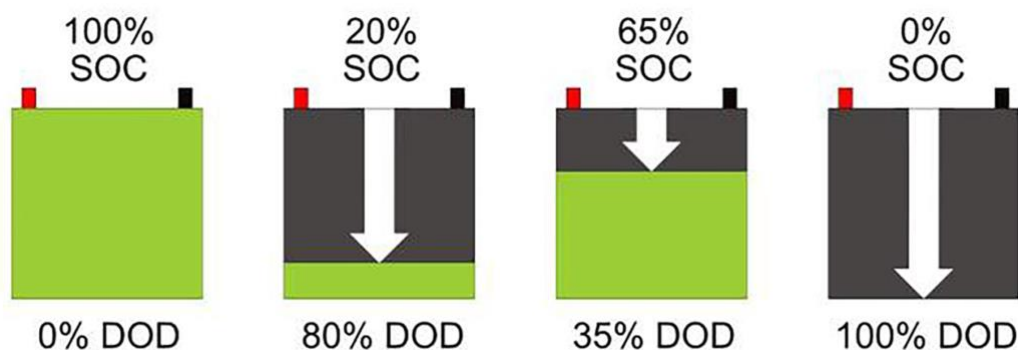
- **Vybíjecí a nabíjecí rychlost**

Rychlost nabíjení a vybíjení je dána velikostí proudu tekoucí baterií. Čím větší proud do baterie dodáváme nebo naopak odebíráme závisí na samotné baterii a jejím C-ratu. Obecně platí, čím větší teče proud baterií, tím se baterie zahřívá a rychleji degraduje. Uvádí se tři stupně rychlosti nabíjení [16]:

- Pomalé nabíjení (*Normal Charge*) – 0.1 C
- Rychlé nabíjení (*Fast Charge*) – 1 C až 0,5 C
- Ultrarychlé nabíjení (*Quick Charge*) – 0,1 C až C/20

- **Hloubka vybití (%)**

Hloubka vybití neboli **DoD** (*Depth of Discharge*) je údaj o baterii, určující kolik procent energie bylo odebráno z již plně nabitě baterie. Pokud DoD dosahuje 100 %, znamená to, že celá baterie je vybitá (bez energie), což má negativní dopad hlavně u lithiových baterií, kdy tento stav je již alarmující a dochází k degradaci baterie. Případné podvybíjení baterií má negativní dopady i u jiných technologií. [15], [17]



Obr. 7: Porovnání parametrů DoD a SoC [18]

- **Samotné zpracování článku a kvalita řídicí elektroniky**

Tato podmínka závisí na použitém materiálu a kvalitě zpracování. V případě, že baterie bude vyrobena s výrobní vadou, není možné předejít zničení baterie ani při použití velmi kvalitní řídicí jednotky (BMS – Battery management system), která se stará o řízení toku energie baterií. Tímto faktem je svázaná podmínka pro přesnost a preciznost výrobního procesu baterií. Baterie, zejména ty lithiové, by se měly vyrábět v co nejčistším prostředí, ideálně zakonzervovaném v inertním plynu. I malé nečistoty a případná vlhkost výrobního prostředí může později znamenat velmi rychlé zničení baterie. [15]

4.3 Bateriové technologie

Na poli bateriových technologií v roli akumulace energie zažívají velký rozmach baterie lithiové. Nesmíme ale zapomínat i na ostatní dnes využívané technologie, jako je starší olověná baterie nebo poměrně nadějně vysokoteplotní články sodík-sírové a také vanadium průtočné baterie. Každá technologie má své limity, proto se hodí pro jinou aplikaci.

4.3.1 Olověné baterie (Pb)

Koncept prakticky využívané olověné baterie sahá do roku 1860, kdy Pb baterii začal zkoumat Raymond Gaston Platné. [19]

Struktura baterie se skládá z katody, anody a elektrolytu. Katoda je tvořena z PbO_2 , anoda z Pb a kyselina sírová tvoří elektrolyt – ten je zde v kapalném stavu. Mezi nesporné výhody olověné technologie spadá malé denní samovybíjení. Baterie se za pokojové teploty vybíjí <0,3 % za den. Relativně vysoká účinnost (63-90 %) a nízká pořizovací cena, která se pohybuje v rozmezí 50 až 600\$/kWh, daly olověné baterii status nejrozšířenější a nejlevnější technologie. Pb baterie jsou rozděleny dle typu a konkrétního využití na [14], [19], [20]:

- **SLI**

Zkratka SLI v sobě skrývá výrazy „*starting*“, „*lighting*“ a „*ignition*“. Jde o baterie vyžívané především v letadlovém a automobilovém průmyslu, kde je najdeme hlavně u diesellových spalovacích automobilů. Tyto baterie jsou schopny dodat velký proud (řádově stovky A) po krátkou dobu (např. doba potřebná na nastartování vozidla). Nelze ji ale podvybíjet, následně pak rapidně ztrácí svou kapacitu. [14], [19], [21]

- **Trakční**

Trakční typ baterie, jak už název vypovídá, najde uplatnění v elektrických tahačích, autobusech a tramvajích. Tato baterie jsou schopny dodávat trvale velký proud. Možné další využití pro trakční baterii je také využití v bateriovém systému pro delší dodávku výkonu. [19]

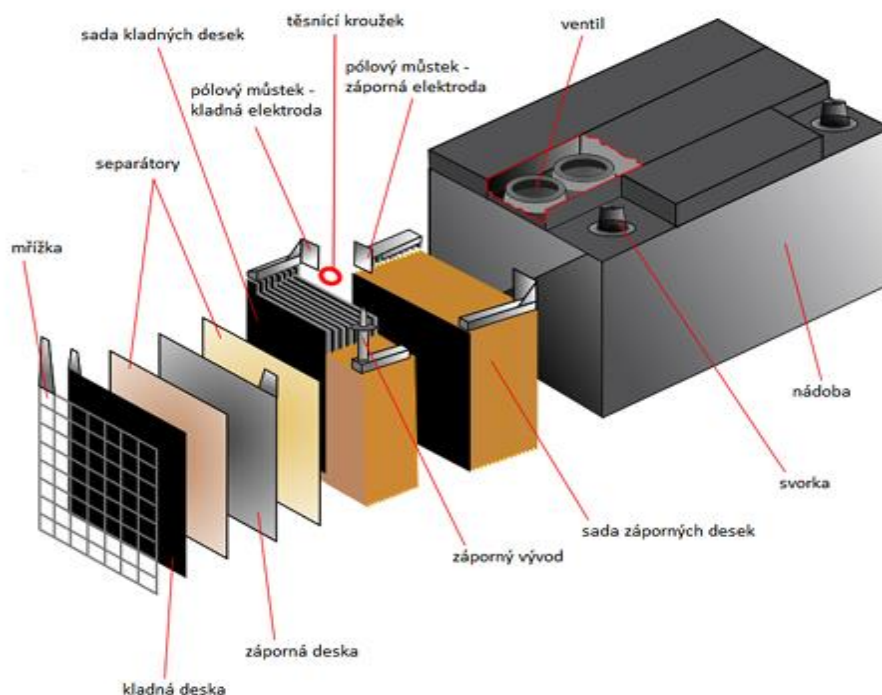
- **Baterie umožňující hluboké vybití**

Takzvané „*deep-cycle*“ baterie jsou zkonstruovány tak, aby poskytovaly nepřetržitou dodávku energie potřebnou např. pro invalidní, golfové a vysokozdvizné vozíky. [20]

- **Uzavřená olovněná baterie**

Jak již z názvu vyplývá, jedná se o uzavřený systém, většinou tvořený z plastového obalu, ve kterém se nachází všechny komponenty olovněné baterie. Olovněné baterie ale nelze zcela utěsnit, tak aby se nevypařoval elektrolyt, proto musí tento typ baterie obsahovat i ventily, které umožní uvolnění plynů, pokud dojde k nárůstu tlaku. [14], [20]

Na trhu lze nalézt i další typy olovněných baterií, včetně *AGM* baterií, které jsou známy spíše jako gelové baterie. Jde o ventilem řízené baterie. Od klasických olovněných baterií s tekutým elektrolytem se liší formou elektrolytu. Ten zde není v tekuté formě, ale je tvořen z gelu. Díky těmto vlastnostem dosahují větší cyklické životnosti, a především se snižuje jejich samovybíjení, které atakuje hranici hodnoty pod 2 % kapacity za měsíc. *AGM* baterie lze nalézt u motocyklů, kde v případě pádu nedochází k úniku elektrolytu. [22]



Obr. 8: Řez olověným akumulátorem [23]

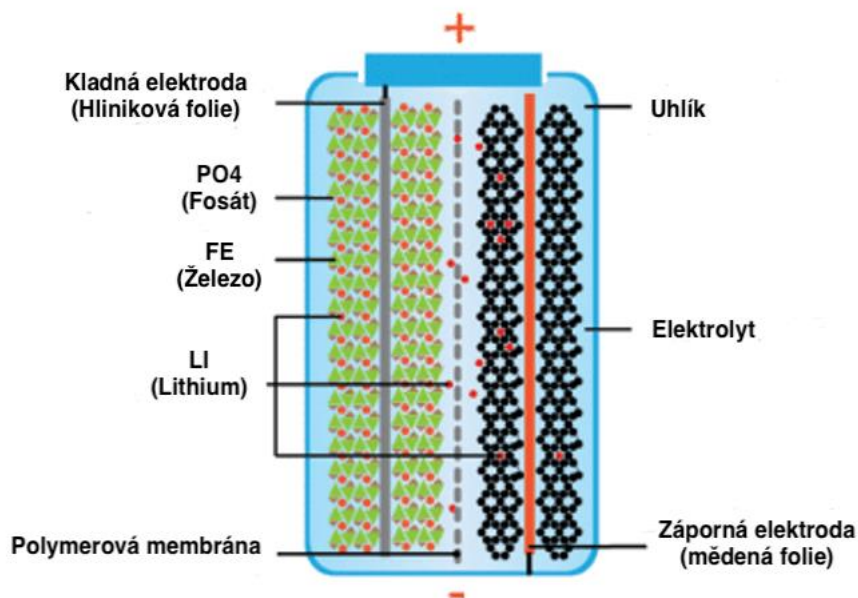
4.3.2 Lithiové baterie

Lithium – iontové baterie (Li-Ion) byly vyvinuty v Japonsku společností Asahi Kasei Co. Jako první komerčně využitelnou baterii představila v roce 1991 firma Sony Co. Li-Ion baterie byla přijata světovým trhem velmi rychle, díky své vysoké výkonové hustotě, dobrému výkonu a neexistujícímu paměťovému efektu, jakým trpěly nikl-kadmiové (Ni-Cd) a novější nikl-hydridové (Ni-MH) články. Malé Li-Ion baterie najdeme hlavně ve spotřební elektronice (notebooky, přenosné nářadí apod.). Od uvedení na trh se jejich energetická hustota z původních 80 Wh/kg ztrojnásobila až na 265 Wh/kg. [24], [25]

Podobně jako olověná baterie je Li-Ion baterie tvořena z katody, anody a elektrolytu. Záporná elektroda je vyrobena z oxidu kovového lithia, kladná elektroda z grafitického uhlíku. Obě elektrody jsou ponořeny v organické kapalině zastupující elektrolyt. Dnešní lithiová baterie má velmi blízko k dynamitu, lithium v Li-Ion bateriích není v pevné podobě, ale je umístěno do krystalové mřížky. [14], [19]

Lithium-železo-fosfátové baterie lze nalézt pod obchodní zkratkou LiFePO₄ nebo také LFP. LFP články jsou momentálně velmi perspektivní v oblasti akumulace elektrické energie. Jejich parametry jsou v porovnání s klasickými olověnými bateriemi na dosti vysoké úrovni, a kromě toho také netrpí tzv. „sulfatací“. To je nepříznivý stav baterie, při kterém dochází k tvorbě nerozpustného síranu olovnatého. LFP baterie jsou velmi často

oblíbené u majitelů domácích fotovoltaických elektráren, jelikož životnost článků se blíží hodnotě 10 000 cyklů nabití a vybití a dle výrobců jsou nehořlavé. Ani technologie založená na lithiu se neobejde bez určitých neduhů. Jeden z nich se týká právě hodnoty DoD, která by se pro baterie měla pohybovat na úrovni 20 %, hodnota SoC se doporučuje udržovat na hodnotě 80 %. [26]

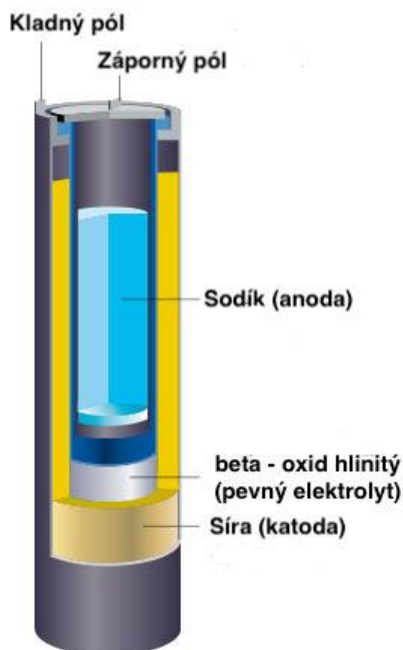


Obr. 9: Strukturální schéma LFP baterie [26]

4.3.3 Sodíkovo-sírové baterie (NaS)

Dalším z kandidátů pro akumulaci elektrické energie je sodíková baterie, která pochází z Japonska, konkrétně si ji patentovala a také ji již více než čtvrt století vyvíjí firma NGK-Insulators. Jelikož je NaS baterie patentována výše zmíněnou firmou, musí se na její provoz poskytovat licence, tu zajišťuje firma Basf. [27]

NaS baterie je zajímavá v tom, že její pracovní teplota se pohybuje mezi 300-350 °C, vyšší teplota má za následek snížení účinnosti, která se pohybuje v rozmezí 75-90 %. Vyšší teplota je zde kvůli elektrodám, které se se udržují v kapalném stavu. Při srovnání s ostatními elektrochemickými akumulátory NaS technologie disponuje vysokou cyklickou životností, výrobce udává hodnotu až 4500 plných cyklů nabití a vybití. Energetická hustota baterie dosahuje hodnoty 400Wh/l, při srovnání s dnes populární Li-Ion baterií jde o přibližně srovnatelnou hodnotu. Naopak nepříliš vysoká hodnota výkonové hustoty, která se pohybuje v rozmezí 140-180 W/l posílá NaS baterii na spodní příčky v porovnání s ostatními kandidáty. [20], [27], [28]



Obr. 10: Průřez NaS článkem vyvíjeným spol. NGK-Insulators [27]

Jak je možno vidět na Obr. 10, NaS článek se skládá ze záporné sodíkové elektrody, která je uprostřed obklopena trubičkou s elektrolytem z beta oxidu hlinitého. Oxid hlinitý tvoří elektrolyt v pevné formě. Trubice je obklopena kladnou sirnou elektrodou. Při vybíjení článku je kapalný sodík vyveden prstencem mezi vnitřním povrchem elektrolytu a trubicí. Sodík oxiduje na rozhraní sodík/beta korund a díky tomu vznikají ionty Na^+ . Ionty procházejí skrze elektrolyt a spojují se se sírou, která redukuje ionty na kladné elektrodě. Při nabíjecím cyklu dochází přesně k opačným chemickým dějům. Trubice zajišťuje kontrolu nad množstvím sodíku a síry. Pokud by se zde prvky nacházely ve vyšším množství, došlo by k uniku tepla a článek by mohl způsobit požár. [29]

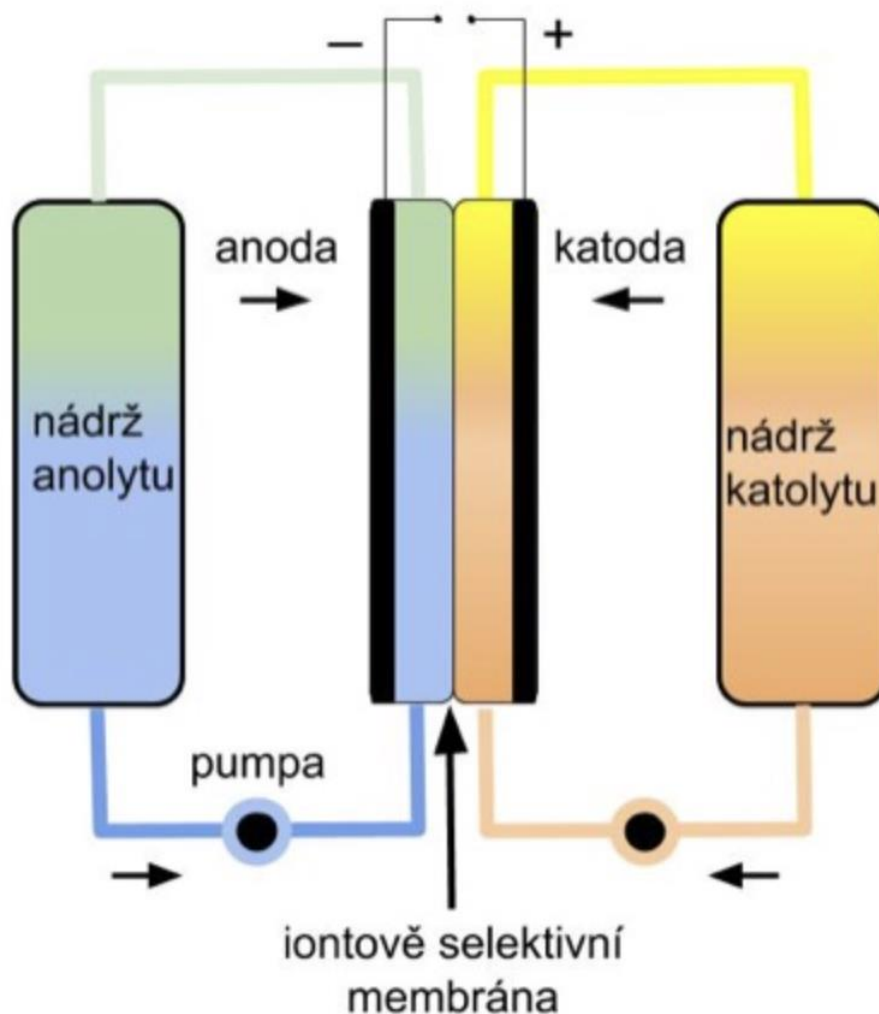
4.3.4 Vanadium redoxní průtočná baterie (VRB)

Vanadium redoxní baterie jsou označovány zkratkou VRB, v některých literaturách jsou uváděny také jako VRFB. VRB spadají do kategorie průtočných baterií (RFB), které jsou v posledních letech vyvíjeny na základě poznatků rozmanitých chemických látek. Díky tomu existuje více typů baterií, využívajících jiné prvky. Jde především o baterie zinko-bromité (Zn-Br), polysulfid-bromové (PSB) a v neposlední řadě také VRB, kterými se zabývá tato podkapitola. VRB baterie jsou dnes nejvyspělejší technologií z rodiny RFB, proto má smysl se jimi zabývat pro tuto konkrétní aplikaci.

Baterie je poněkud složitý systém, její schéma lze nalézt na Obr. 11. Skládá se ze dvou nádob s elektrolyty a ty slouží pro ukládání energie redoxních párů. Systém musí obsahovat

i jiné prvky sloužící pro chod článku. Jedním z prvků je čerpadlo, které je umístěné u každé nádoby, díky nimž může docházet k průtoku elektrolytu. Další z prvků je řídicí jednotka (na obrázku značena jako BMS). [20], [30]

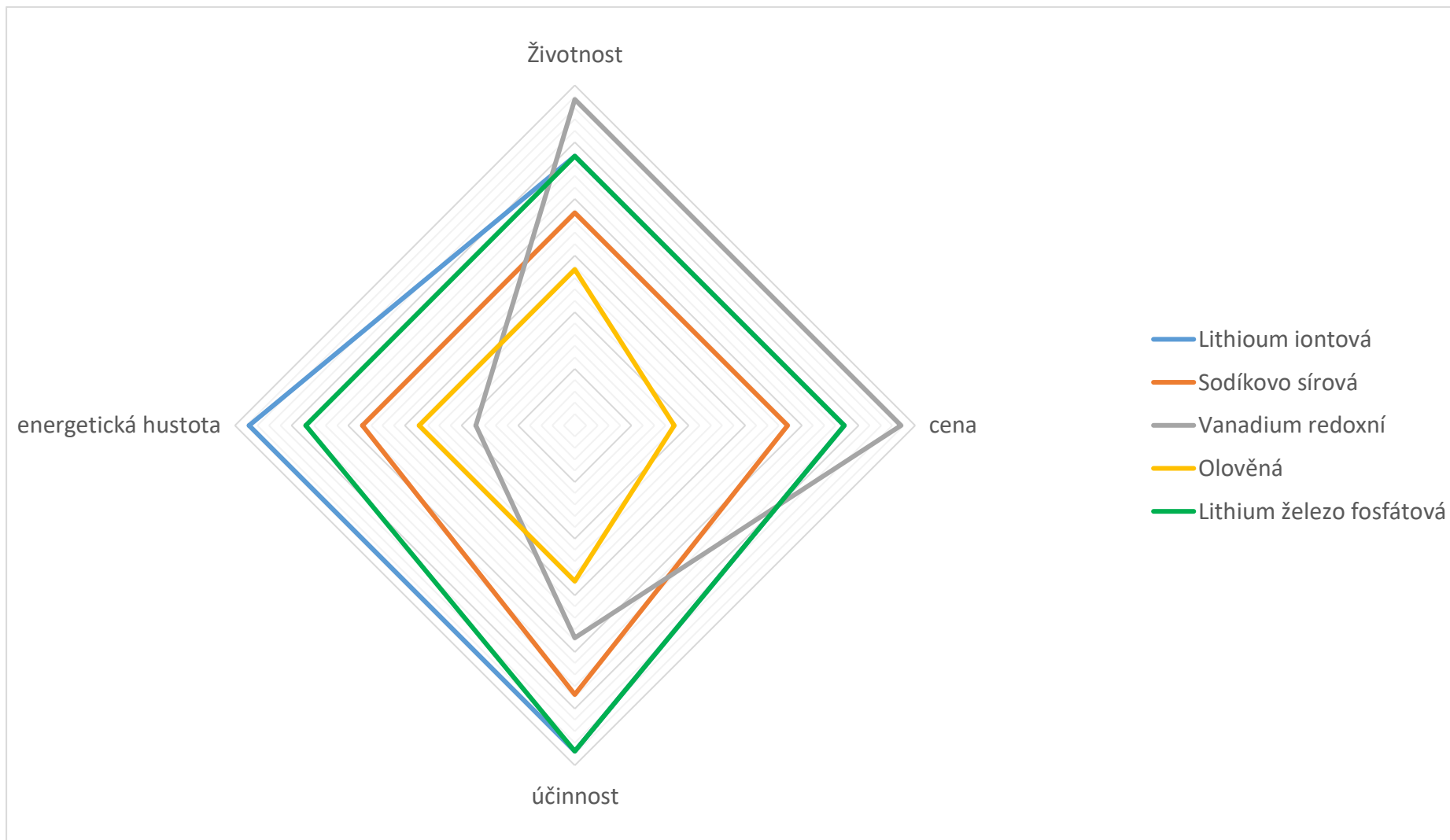
Cyklus nabíjení a vybíjení baterie se zakládá na oxidačně-redukční reakci iontů, u VRB baterií jsou to ionty vanadu. Oproti konvenčním technologiím vyniká dlouhou životností, při které nedegradují elektrody. Životnost také nezávisí na počtu nabití a vybití. [20], [30]



Obr. 11: Strukturální schéma RFB akumulátoru [31]

4.4 Porovnání baterií

Parametry jednotlivých typů technologií byly vyňaty do Tab. 4, ze které jsem následně vytvořil paprskový graf. Tento typ grafu je spíše známý jako „*spider-graph*“ a je hojně v literatuře využíváný pro přehledné zobrazení parametrů akumulátorů. Graf je zobrazen níže na Obr. 12.



Obr. 12: Porovnání jednotlivých bateriových technologií pomocí paprskového grafu [14], [19]

Tab. 4: Přehled hodnot pro jednotlivé bateriové technologie [14], [19]

Parametr	Lithium – iontová	Sodík – sírová	Vanadium Redoxní	Olověná	Lithium železo fosfátová
Cyklická životnost	7 000 až 10 000	4 500	10 000 až. 16 000	2 000	až 10 000
C-rate	0,2C až 1C	1C až 6C	0,2C až 0,4C	0,2C až 3C	1C
Kapacita	jednotky až desítky MWh	stovky MWh	desítky MWh	jednotky až desítky MWh	jednotky až desítky MWh
Cena	vyšší	vyšší	vysoká	nižší	vyšší
Účinnost	93 % až 98 %	75 % až 90 %	85 %	63 % - 90 %	více než 95 %
Energetická hustota (Wh/kg)	100 až 265	80 až 120	10 až 20	30 až 50	90 až 120
Objemová hustota (Wh/l)	200 až 500	150 až 250	15 až 25	50 až 90	220

4.5 Bateriové úložiště obecně

Celé úložiště se skládá nejen ze samotných baterií, ale také z hlavní řídicí jednotky, měniče, systémů pro hlídání stavu nabití a vybití baterií, klimatizace pro chlazení nebo vytápění a také se zde nachází bezpečnostní a protipožární systémy. Nesmí se opomenout i hlavní vypínač stejnosměrného napětí, který v případě poruchy odpojí baterie a zabrání nechtěnému ději. Tento vypínač lze ovládat automaticky i manuálně pomocí obsluhy. Všechny komponenty jsou obsaženy ve velkých kontejnerech, nicméně dnes se využívá rackové koncepce. Problém systémů obsažených ve velkých kontejnerech spočívá v nákladné přepravě, problematickém chlazení a zhášení. Výrobci bateriových systémů často využívají modulární koncepci úložišť, která je výhodná nejen na přepravu, ale hlavně na možnost jednoduššího spojení více modulů, tím lze dosáhnout větší kapacity. Na trhu dnes existuje celá řada výrobců úložišť, od kterých si je možno nechat navrhnout a postavit systém (Tesla, Toshiba, LG, ABB a mnoho dalších). [32], [33]



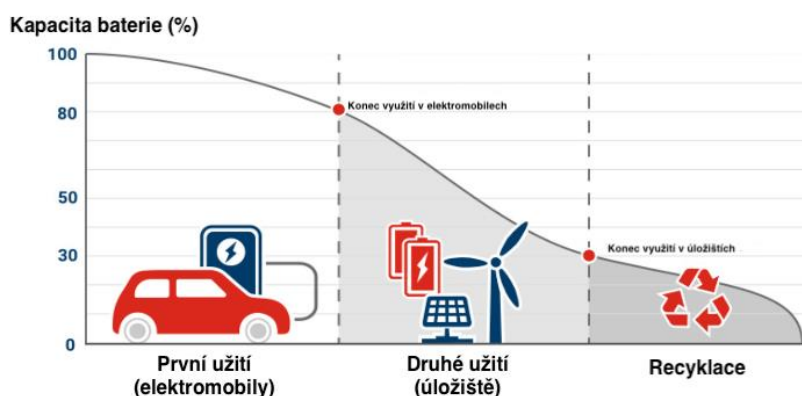
Obr. 13: Konkrétní stavba rackového úložiště [34]

Dimenzování výkonu úložiště je možno udělat vícero způsoby, které jsou závislé na aplikaci. Pro konkrétní řešení se výkon určuje z kapacity, kdy výkon je dimenzován na

výkon použití střídače nebo také dle *C-rate*. V případě využití úložiště u bloku klasické elektrárny se výkon dimenzuje na vyšší hodnotu oproti obnovitelným zdrojům, kdy se v tomto případě využívají spíše velké kapacity a menší výkony. Dle Kodexu je za výkon úložiště považován výkon střídače. [4]

4.6 Trendy v oblasti bateriových systémů

Oblast bateriových systémů zasáhl nový trend, který spočívá ve využívání tzv. „*second-life*“ baterií. Jak již z názvu vyplývá, jedná se o již používané baterie, které sloužily především v automobilech. Některé automobilky neumožňují vyjmutí opotřebených baterií (Tesla), najdou se ovšem i automobilky nevyužívající integrovanou koncepci baterií (Škoda Auto, Mercedes Benz). Tyto baterie jsou firmami specializujícími se na znovu využití baterií z automobilů vyndány a repasovány. Jelikož tyto baterie nedosahují ani po repasování parametrů nových článků nastává proces porovnávání. Jednotlivé články jsou dle stavu rozděleny a následně články s podobnými parametry spojeny do jednoho bloku. Využití již používaných článků přináší benefity ve formě ekonomické úspory. Úspora činí bezmála 20 % oproti využití nových článků. Ovšem také využití starších baterií přináší omezení v provozu, kdy se s bateriemi pracuje s maximálním SoC = 70 až 80 %. Další výhoda repasovaných článků spočívá v hledisku ekologickém. Těžba lithia značně zatěžuje životní prostředí a také se na Zemi nachází v omezeném množství. Je možné obecně říct, že znovu využívání vysloužilých baterií je ve prospěch planety. [32], [35]



Obr. 14: Proces využívání bateriových článků [35]

4.7 Legislativní rámec akumulace v České republice

Při připojení velkých bateriových systémů pro poskytování podpůrných služeb je nutné se opřít aktuální platnou legislativou ČR, která by měla zahrnovat nutné podmínky pro

akumulaci elektrické energie a definování BESS. Legislativou je myšlen Energetický zákon (EZ), Kodex PS a Pravidla pro provozování distribuční soustavy (PPDS). V posledních letech je možno pozorovat velký technologický pokrok akumulace, který značně přeběhl legislativu, a tudíž dnešní legislativa není zcela připravena na provoz akumulčních jednotek.

- **Energetický zákon**

Energetický zákon č.458/2000 Sb. je zákon, který vešel v platnost dne 28. listopadu 2000 a zabývá se podmínkami podnikání v elektroenergetických odvětvích. Tento zákon však nereflektoval dynamické požadavky energetického trhu, jako je decentralizace energetiky, komunitní energetika a také akumulace elektrické energie. [36] Nově na zákon měla navázat novela, která bohužel poslaneckou sněmovnou nebyla v roce 2021 schválena. Taktéž nově vznikající zákon se již stavěl „čelem k moderní energetice“ a navazoval na aktuální trendy v energetickém odvětví. V současnosti není možné podnikání v rámci akumulčního zařízení jako samostatně stojící (*stand-alone*) připojeného do sítě. Tímto narážíme na nejasnost se *Zimním balíčkem evropské komise*, který zahrnuje změnu v legislativě. Jedná se o celkem 8 návrhů v oblasti „čisté energie“, která by vedla k efektivitě při využívání obnovitelných zdrojů v EU. [37]–[39]

Teoretická možnost schválení a zavedení nového EZ je od roku 2024. [39]

- **Kodex PS**

V aktualizovaném Kodexu PS, konkrétně Části II – „*Podpůrné služby*“ je nyní zaveden pojem *Agregační blok (AB)*, tento blok nahrazuje dřívější pojmenování *fiktivní a obchodní blok*, o kterých pojednává starší vydání kodexu. AB je tvořen alespoň jedním výrobním modulem a další jednotkou, v tomto případě se jedná o omezený zásobník elektrické energie, do které spadá i BESS. V kodexu jsou dále zavedena pravidla pro omezené zásobníky energie. Tato pravidla spočívají ve stálé připravenosti zařízení za běžných podmínek a také v rámci certifikace zařízení je nutné doložit nabíjecí a vybíjecí strategii. Nabíjecí strategii je nutné provozovatelem předložit minimálně jeden měsíc před začátkem certifikačního řízení. Součástí certifikace je nutné provést certifikační měření, a to z důvodu, zajištění připravenosti systému. BESS lze tedy využít v rámci AB spolu s výrobním blokem včetně obnovitelných zdrojů (OZ) (jako jsou Fotovoltaické elektrárny (FVE) a Větrné elektrárny (VTE)). Nicméně úložiště může být provozováno pouze v rozmezí 45–90 sekund, po uplynutí této doby musí dodávku výkonu převzít výrobní jednotka. Ovšem nelze využít BESS jako samostatně stojící zařízení. [4], [38]

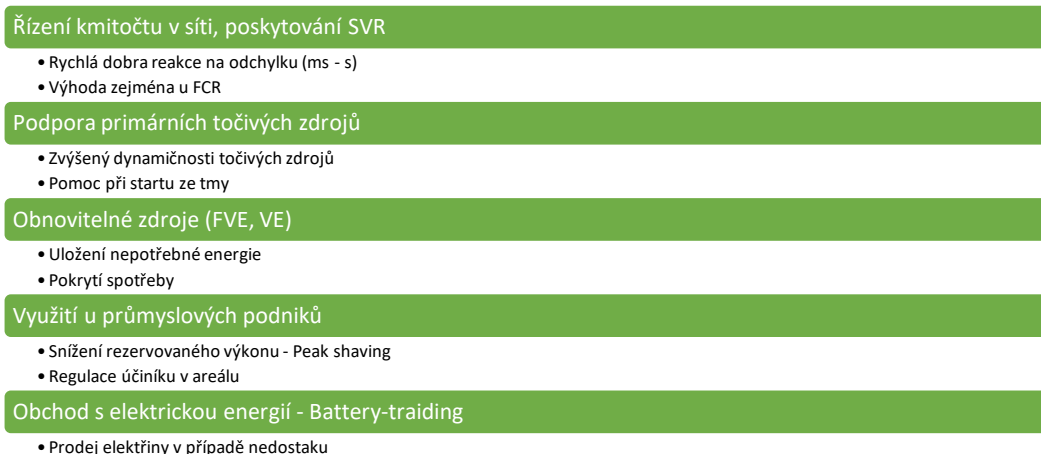
- **Pravidla pro provozování distribuční soustavy**

Pravidla pro provozování DS, zkráceně také PPDS navazují na výše uvedený Kodex PS a mají následující tři povinnosti:

- Stanovují minimální technické, plánovací, provozní a informační požadavky pro připojení uživatelů k DS,
- Poskytují značné informace bez nutnosti práce s právními a technickými materiály,
- Stanovují pravidla, které zajišťují případnou spolupráci mezi jednotlivými subjekty na energetickém trhu.

4.8 Potenciál nasazení bateriových systémů

Tato podkapitola se zabývá potencionálním uplatněním bateriových systémů v podpůrných síťových službách ČR. Veškeré informace vycházejí z volně dostupných zdrojů a informací od odborníků z praxe. Informace se vztahují k aktuálnímu stavu české energetiky, která navazuje na stav legislativní. Níže uvedené poznatky nemusejí v budoucnu již korespondovat s budoucí platnou legislativou. Systémy využívající akumulacích článků pro akumulaci elektrické energie nachází uplatnění na celé škále aplikací. O využitelnosti systémů vypovídá Obr. 15.



Obr. 15: Možnosti využití úložiště

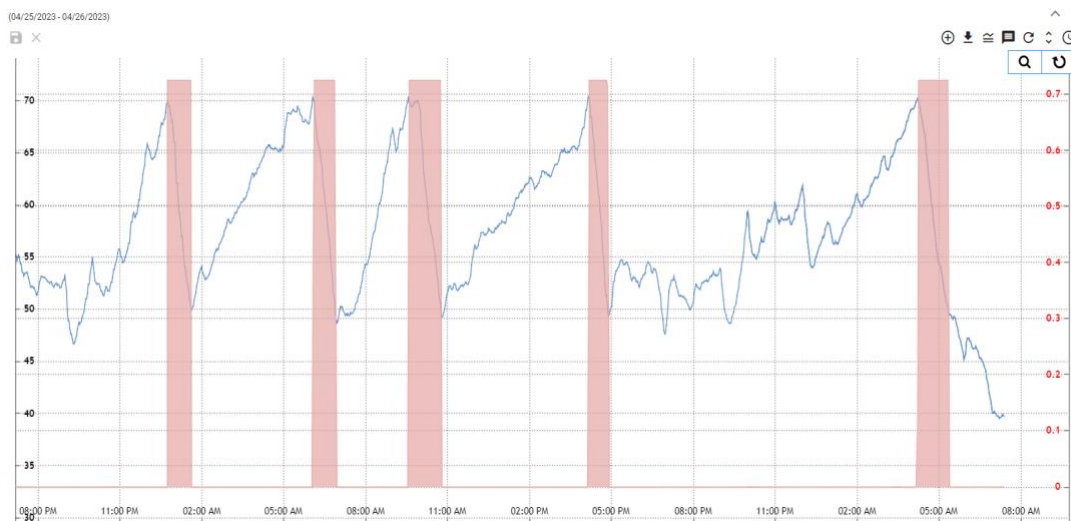
4.8.1 Podpora primárních zdrojů, poskytování SVR

Baterie se dnes hojně využívají jako podpora primárních točivých zdrojů díky svým dobrým regulačním vlastnostem a také díky svým okamžitým reakcím na poskytnutí výkonu. SVR jsou postaveny na udržování jmenovitého kmitočtu v síti na základě vyrovnávání činného výkonu v síti. Základní idea BESS v SVR je taková, že při přebytku

energie se baterie nabíjí a pokud je energie nedostatek, baterie poskytuje svůj výkon na udržení výkonové bilance mezi spotřebou a výrobou. Ovšem nabíjení baterií nesmí ohrozit parametry sítě. Tudíž musejí mít definovanou strategii vybíjení a nabíjení, která není stále v legislativě zakotvena. [38]

První službou, kde je možno hledat uplatnění BESS je **FCR**. Tato služba se vyznačuje rychlými změnami výkonu ze záporného na kladný a naopak. Baterie tedy není tak hluboce podvybíjena a namáhána, tím pádem dochází k prodloužení jejího cyklického života. Maximální a minimální výkon pro tuto službu je 25 MW a 1 MW. Tyto hodnoty výkonů jsou dnešním technologickým pokrokem dosažitelné. Z předchozích poznatků je jasné, proč pro FCR je ideální volbou baterie lithium – iontová, případně LFP. Tomuto faktu přispívá i to, že baterie na bázi lithia jsou ve světě i u nás hojně nasazovány právě pro tuto službu.

Při poskytování FCR pomocí BSAE nese značné nevyužití potenciálu vyplývající z Kodexu PS. Dokument uvádí, že při poskytování FCR musí být systém v provozu od 45 do 90 sekund, poté musí být nahrazen primárním zdrojem. Návratnost systémů při poskytování FCR je dnes zhruba 7-9 let provozu. Zde dochází k platbě pouze za rezervaci výkonu, přičemž RE poskytnutá FCR je zdarma. [34], [40]



Obr. 16: Graf znázorňující poskytování FCR pomocí úložiště [34]

Graf na Obr. 16 reprezentuje reálnou aplikaci úložiště a točivého zdroje ve službě FCR. Tento graf mi byl poskytnut firmou SUAS GROUP, s.r.o. Na levé ose lze nalézt hodnoty SOC (%), pravá červená osa znázorňuje výkon vybiřovací strategie pro návrat na SOC 50 %. Vyobrazenými červenými bloky je znázorněno vybíjení.

Služba aFRR je známá svými nároky na velkou rozmanitost výkonů. Na základě velkých výkonů je baterie hluboce podvybíjena a tím pádem dochází ke snižování její životnosti.

Tento problém by mohlo vyřešit využití VRB baterií, které jsou ovšem drahé a poruchové. Příjem za poskytování aFRR se skládá ze složky za regulační energii a také za rezervovaný výkon.

V případě mFRR jde o podobný případ, BESS v této aplikaci pomáhá dodat energii do sítě, dokud nezareaguje výrobní blok. Klasické elektrárny, zejména ty uhelné jsou známé svými horšími regulačními a dynamickými vlastnostmi, taktéž u služeb dochází ke snižování hodnoty *FAT*. Může tedy nastat situace, kdy točivý zdroj nebude schopen dodat požadovaný výkon za požadovaný čas. To lze vyřešit pomocí BESS, který bude sloužit jako podpora primárního zdroje. Lze využít u 5 minutové i u 12 minutové zálohy. Ideální kombinace pro tento případ je využití baterie a točivého zdroje.

Uplatnění BESS lze nalézt i v ostatních podpůrných službách. Zde je možno se zabývat službou BS – start ze tmy. BS je schopnost bloku najet na jmenovité otáčky a postupně připojovat další prvky sítě. BESS v tomto případě udržuje ostrov v nastavených parametrech a pomáhá také připojování ostatních prvků v síti. Využití samostatného BESS bez podpory primárního zdroje nebude pro BS vhodné. Pokud je aplikace BESS určena pro služby OP a BS, které jsou využívány zřídka, lze zvážit možnost poskytování i jiným PpS, zejména pak SVR. Často poskytovatelé SVR vlastníci točivý zdroj rádi investují do BESS z důvodu možné dimenzace pro více záloh.

Další uplatnění BEES nastává v rámci snížení nároků na palivo a následně produkovaného CO₂ z uhelných elektráren. Pokud je úložiště plně nabito, lze snížit výkon generátoru a zbylý výkon dodávat pomocí bateriového úložiště.

4.8.2 Obnovitelné zdroje

Pro případ obnovitelných zdrojů (OZ) je využití BESS také na místě. Neduh OZ spočívá v nejasné predikci dodávaného výkonu do sítě. Dnes již ale existují jisté postupy, jak předpokládat výrobu z OZ na základě denní doby a počasí, to ale není nikdy úplně přesné. Aby bylo vždy dosaženo výkonové bilance v síti, nevznikaly špičky, instalují se k velkým výrobnám BESS. V případě fotovoltaických elektráren (FVE) se instalují systémy využívající NaS technologii. S odkazem na Tab. 4 je možno vidět, že NaS technologie disponuje velkým C-rate, to znamená, že je možné dosáhnout nabíjení baterie po celou dobu využití FVE. Pro tuto aplikaci se volí úložiště s velkou kapacitou, ale malým výkonem. Dále jsou NaS články oblíbené zejména u FVE na pouštích, kde se snižují nároky na roztopení článku na provozní teplotu. [41]



Obr. 17: Užití BESS u FVE [34]

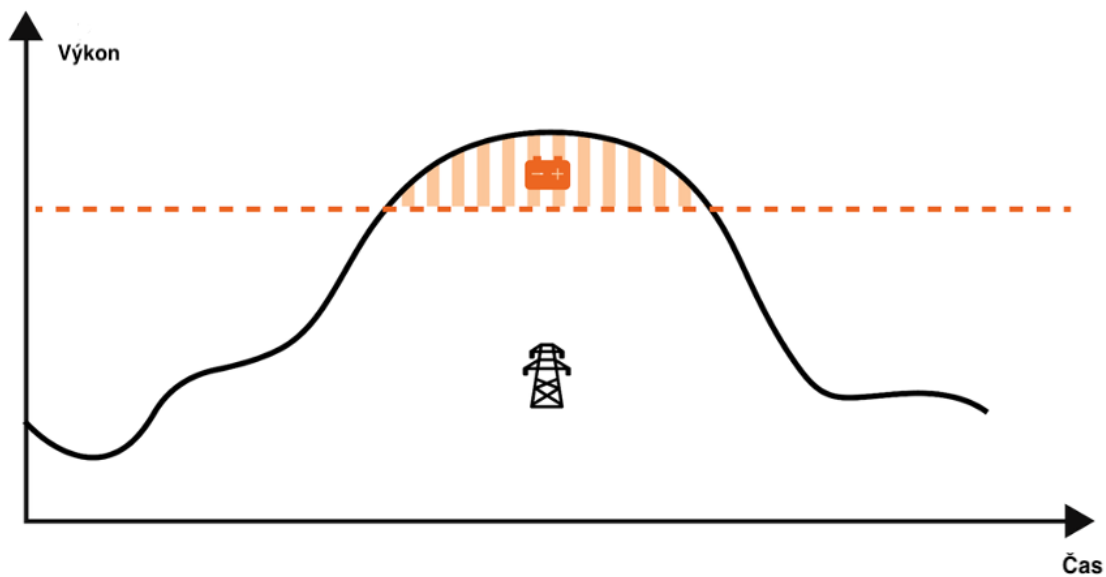
4.8.3 Využití u průmyslových podniků

Velké úložiště je oblíbeno i u velkých nebo středních průmyslových závodů. Velké závody platí za rezervovaný výkon u svého poskytovatele nemalé částky. Díky BESS jsou schopny tento výkon snížit, což přináší velké ekonomické úspory. V další řadě je na místě využití BESS v případě tzv. „*Peak-shavingu*“ neboli oříznutí výkonových špiček v případě zvýšeného odběru závodu. Nejen že dojde ke zlevnění zálohy za rezervovaný výkon, za který podnik musí zaplatit, ale také nebude docházet k výpadkům velkých strojů.

Ukažme si to na příkladě: pokud velká firma disponuje velkými obráběcími CNC stroji, které jsou dnes řízeny počítači, může dojít při velkém odběru k zastavení těchto strojů. Z praxe vím, že tyto stroje jsou náchylné na, byť jen malý pokles napětí v elektrickém rozvodu závodu. Tyto nedostatky je možno BESS odstranit. [25], [33]

Dalším možným využitím bateriového úložiště v případě velkých průmyslových podniků je regulace účinníku. Pokud průmyslový závod nebude kompenzovat svůj účinník na hodnotu odpovídající smlouvě s poskytovatelem, musí platit velké pokuty za snížený účinník ve své podnikové síti.

Přes výše uvedené důvody do BESS rády firmy investují, protože úložiště odstraní nedostatky přenosu elektrické energie. Ve většině případů se instalují systémy s kapacitou řádově stovek kWh s využitím baterií na bázi lithia, zejména pak Li-Ion a LFP baterie.

Obr. 18: Příklad *Peak-shavingu* [42]

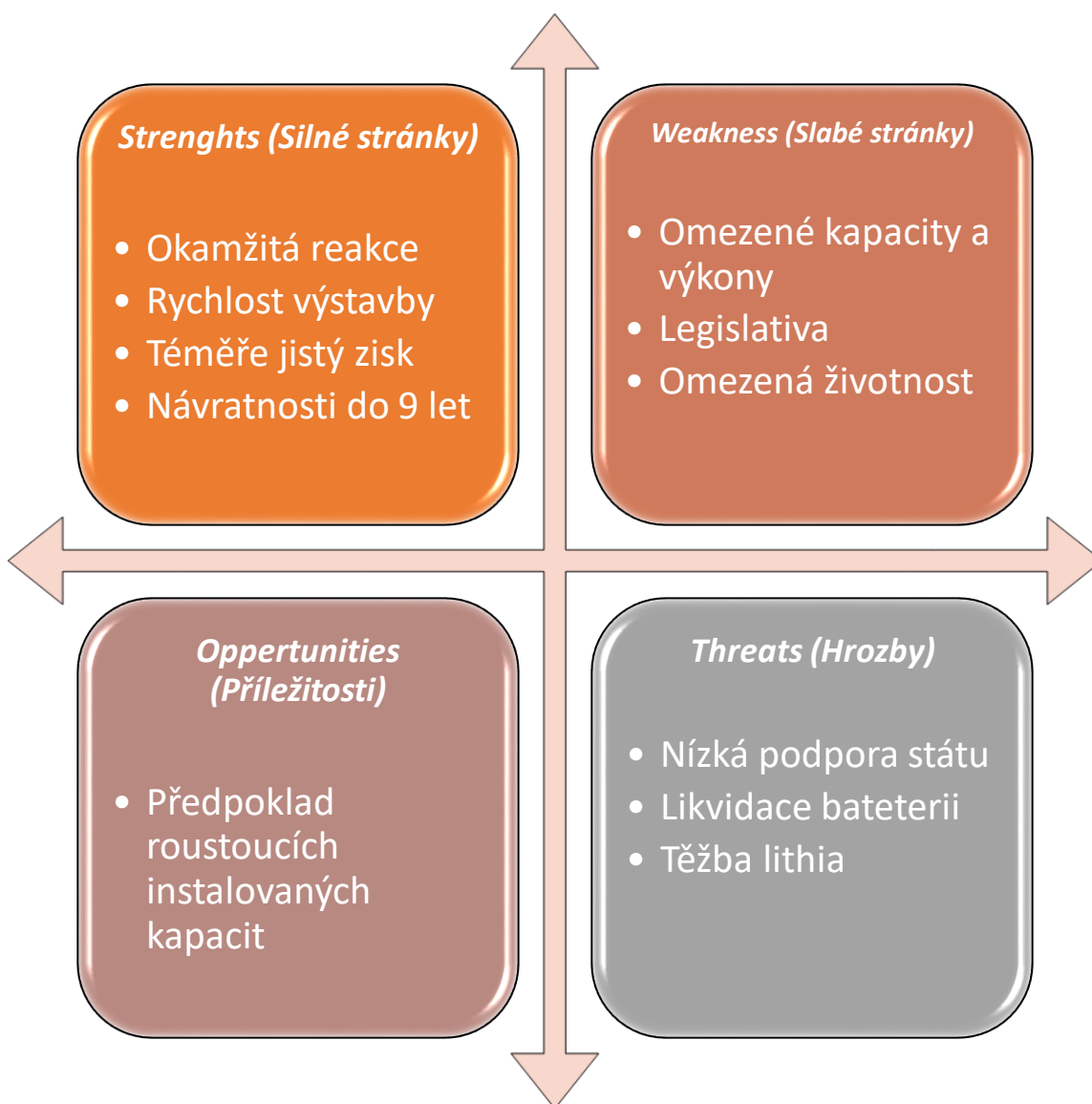
4.8.4 Obchod s elektrickou energií

Další oblast, kde lze nalézt uplatnění pro bateriový systém je obchod s elektrickou energií. Pro obchod s elektřinou existují trhy, které obstarává Energetický regulační úřad (ERÚ). ERÚ pro registrované účastníky trhu s elektrickou energií zpracovává jejich transakce. Pro specifické účely bateriového úložiště, kdy bude energii uchovávat přímo ze sítě. Pokud bude přebytek energie v síti, bude menší poptávka a lze baterii dobít za nižší cenu, která je nabízena na trhu s elektrickou energií. V případě nedostatku elektřiny v síti, bude cena na trhu vyšší, proto lze naakumulovanou baterii vybit do sítě. Licencovaný provozovatel úložiště tedy může profitovat pouze na obchodu s elektrickou energií na trhu. [41]

4.8.5 SWOT analýza

Pro vyzdvižení faktů, která se pojí s akumulací elektrické energie pomocí bateriových systémů byla vytvořena SWOT analýza. Úkolem analýzy je ukázat na silné, slabé stránky a případné hrozby problematiky uskladnění energie. Tuto analýzu je možné si prohlédnout na Obr. 19.

Akumulace pomocí bateriových systémů



Obr. 19: SWOT analýza bateriových úložišť

5 Případová studie

V této studii navrhnu konkrétní bateriovou technologii pro poskytování PpS, kterou na základě vhodného ekonomického výpočtu ohodnotím. K případové studii jsem využil volně dostupná data od společnosti ČEPS. Zvolil jsem data pro aFRR. Ideální by byla volba zálohy FCR, ale hodnoty pro tuto službu nejsou veřejně dostupné a jsou tedy majetkem třetích stran. Mezi nevýhody zálohy aFRR+ spadá velká rozmanitost požadovaného výkonu. Přijímám tedy předpoklad, že baterie bude obstarávat pouze hodnoty, které jsou menší než kapacita baterie.

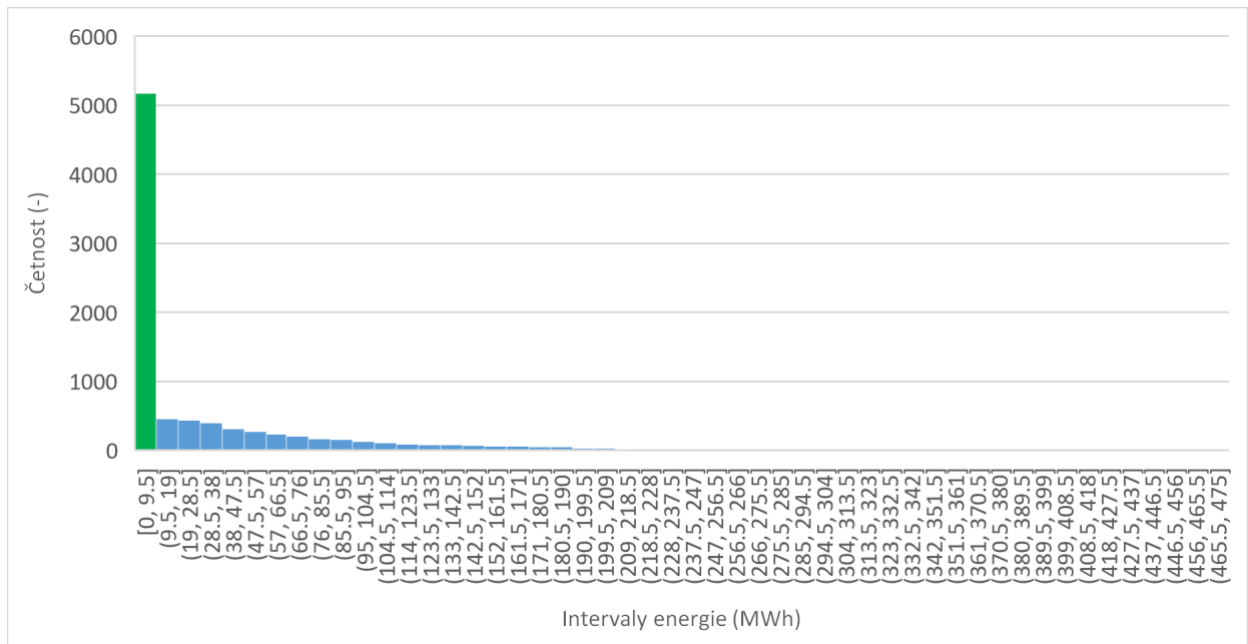
Data jsem stáhl z webových stránek ČEPS, data jsou agregována po jedné hodině. Z toho vyplývá, že hodnoty jsou v jednotkách MWh. Pokud budu vycházet z dat pro celý kalendářní rok (nepočítaje přestupné roky), je to 8760 hodnot. Na Obr. 20 je možné si prohlédnout ukázkou dat v Excelu.

01.01.2013 00:00	43,5
01.01.2013 01:00	0
01.01.2013 02:00	0
01.01.2013 03:00	0
01.01.2013 04:00	0
01.01.2013 05:00	0
01.01.2013 06:00	0
01.01.2013 07:00	0
01.01.2013 08:00	0
01.01.2013 09:00	0
01.01.2013 10:00	0
01.01.2013 11:00	0
01.01.2013 12:00	0
01.01.2013 13:00	13,9
01.01.2013 14:00	0
01.01.2013 15:00	80,6
01.01.2013 16:00	53,5
01.01.2013 17:00	35
01.01.2013 18:00	0
01.01.2013 19:00	23,3
01.01.2013 20:00	71,1
01.01.2013 21:00	4,7
01.01.2013 22:00	0
01.01.2013 23:00	0

Obr. 20: Ukáзка dat v Excelu

5.1 Analýza dat

K analýze dat jsem využil program Microsoft Excel. Z dat pro každý rok jsem vytvořil histogram. Tento statistický graf určuje četnost výskytu hodnot, v tomto případě se jedná o nejčastější výskyt intervalů poskytnuté energie, která byla poskytnuta pomocí zálohy. Jeden z možných histogramů je vyobrazen na Obr. 21. Další histogramy jsem uvedl do příloh na konci dokumentu.

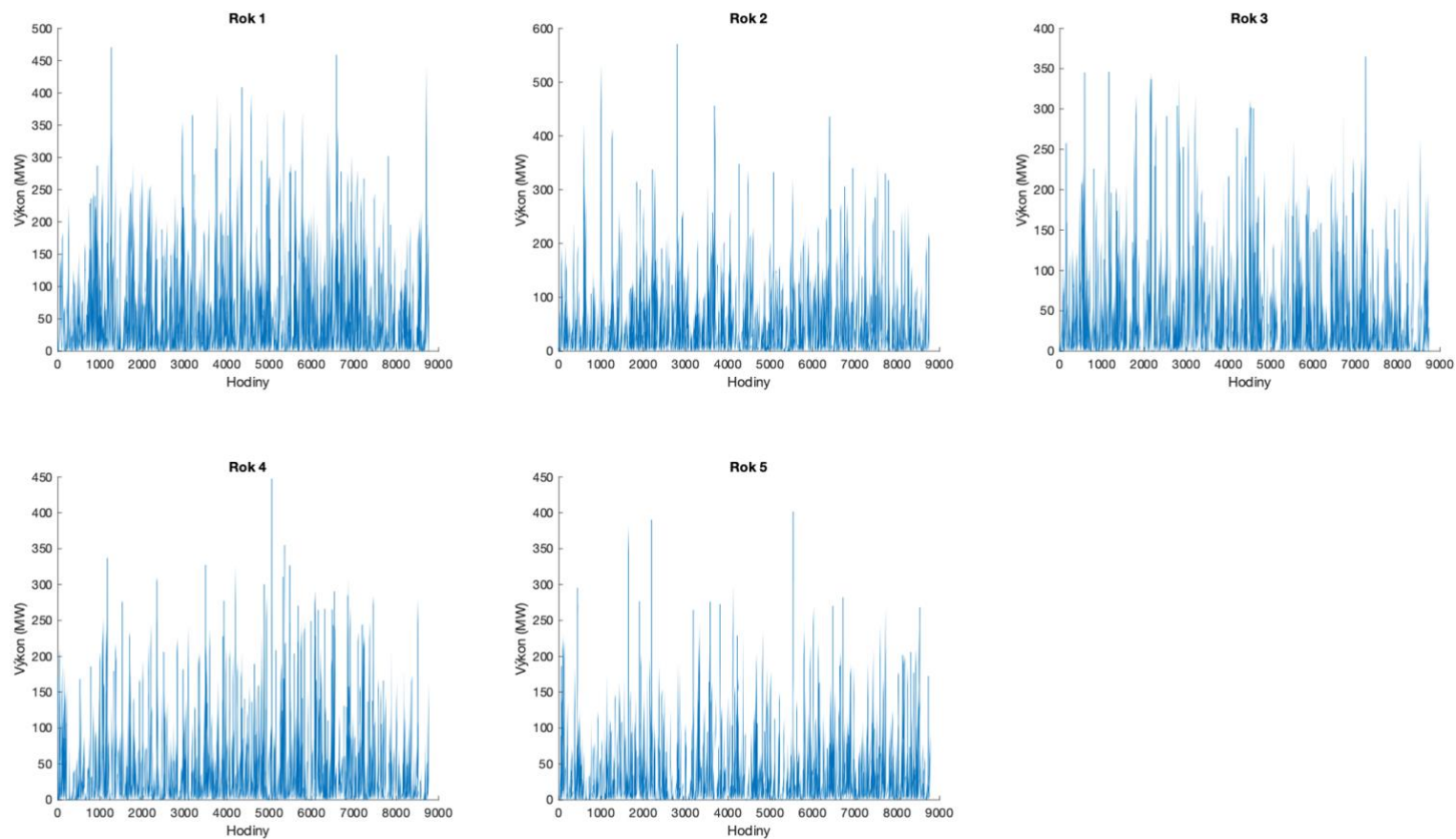


Obr. 21: Histogram intervalů energií pro 1. rok

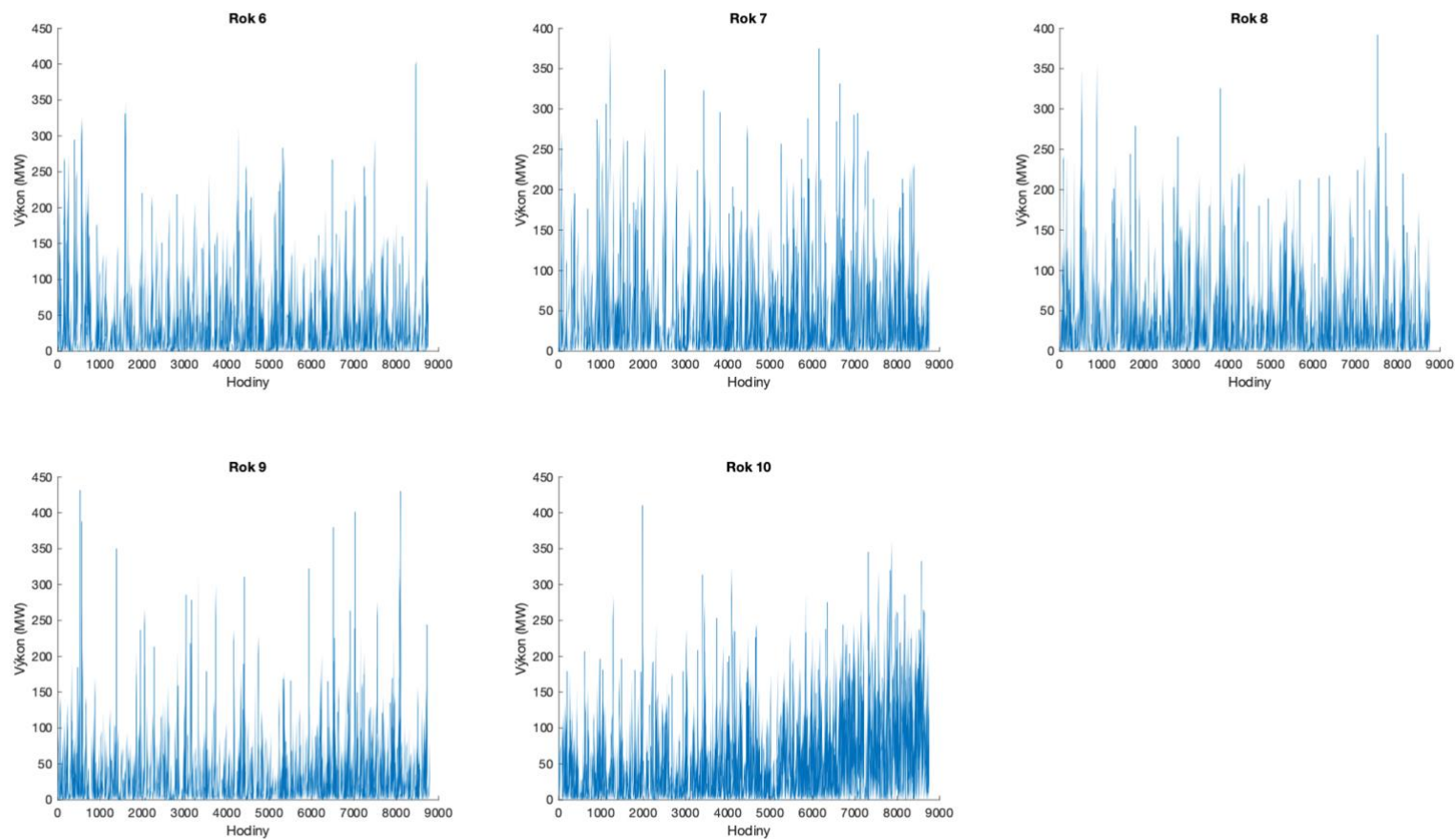
Statistický graf na Obr. 21 ukazuje reálný případ poskytování služby aFRR+, v tomto případě je vidět, že nejčetnější interval při tom tvoří poskytnutá energie od 0 do 9,5 MWh. Data jsem zanalyzoval za posledních 10 let (Rok 1 až 10). Z histogramů jsem poté určil nejčetnější intervaly energií, viz Tab. 5. Pro jednotlivé průběhy zálohy jsem vytvořil v matematickém programu Matlab a subploty jsem uložil jako vektorové soubory .svg. Subploty je možné si prohlédnout na Obr. 22 a Obr. 23.

Tab. 5: Nejčetnější intervaly pro jednotlivé roky

Rok	Nejčetnější interval
1	(0,0:9,5)
2	(0,0:8,9)
3	(0,0:7,4)
4	(0,0:7,7)
5	(0,0:6,4)
6	(0,0:6,8)
7	(0,0:7,1)
8	(0,0:6,3)
9	(0,0:6,1)
10	(0,0:9,1)



Obr. 22: Průběh aktivací aFRR pro jednotlivé roky



Obr. 23: Průběh aktivací aFRR pro jednotlivé roky

5.2 Návrh vhodné technologie

V předešlé kapitole jsem analyzoval data, ze kterých jsem zjistil, že nejčtenější hodnoty jsou v intervalu od 0 do 9,5 MWh. Baterie s kapacitou 9,5 MWh by tedy pokryla co největší množství hodnot a tím by se značně zvýšila výnosnost systému.

Dále následuje volba vhodné technologie pro provoz baterie pro zálohu aFRR. V následujících odstavcích budu vycházet z Tab. 4.

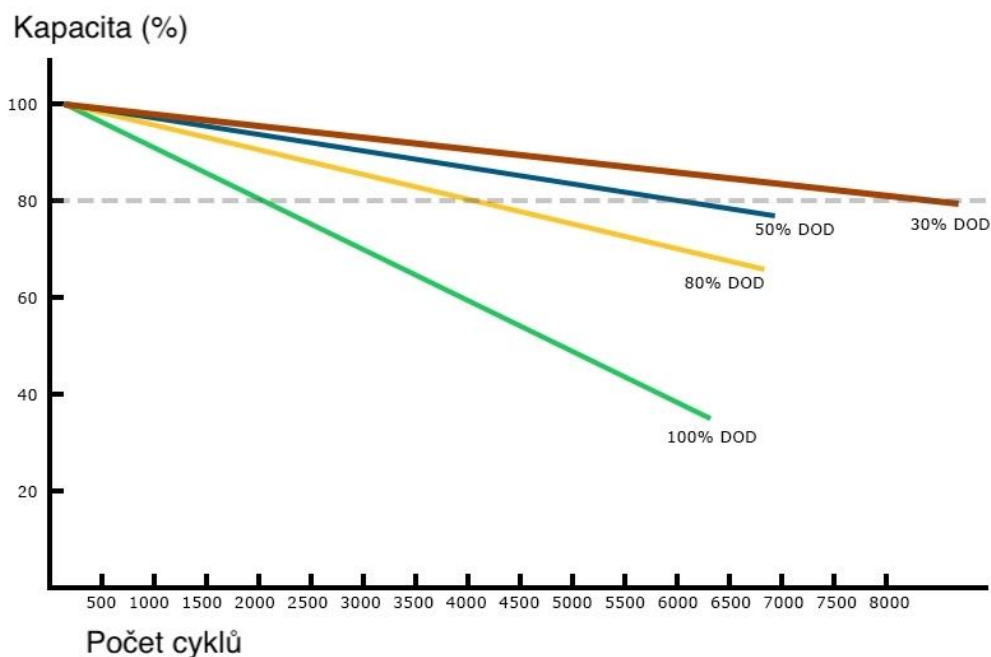
Vhodnost technologie VRB mohu vyloučit z důvodu nákladné údržby a značné poruchovosti její součásti – oběhového čerpadla. Pokud by se měl bateriový systém uplatnit pro poskytování záloh, musí být ideálně nepřetržitě dostupný k následné aktivaci. Tomuto poznatku přispívá fakt, že v celosvětovém měřítku nejsou tyto baterie pro poskytování služeb využívány. Ovšem technologie umožňuje využít teoreticky neomezenou kapacitu, ale pro účely této studie využití VRB nenavrhuji. VRB baterie by našla své využití spíše jako stacionární úložiště dobíjecí stanice pro elektromobily.

Dalším uchazečem na post bateriového úložiště v rámci uplatnění poskytování podpůrných služeb je NaS baterie. Tato technologie umožňuje využití velkých kapacit, ale naopak malých výkonů díky svému C-ratu. Sodík-sírová baterie se hodí spíše pro účely akumulace z OZ nebo pro výstavbu na pouštích, baterie pracuje s teplotou přesahující 300 °C a bylo by nutné baterii uvést na svou provozní teplotu, to by způsobilo obtížnější navržení řídicího systému a udržení zahřáté baterie. Taktéž tuto technologii nedoporučuji.

Baterii založenou na bázi olova, ať už s tekutým nebo gelovým elektrolytem taktéž nedoporučuji z důvodu její malé cyklické životnosti. Pokud by baterie měla sloužit v úložišti pro poskytování podpůrných služeb, zejména těch dynamických, kde baterie vykonají zhruba 10 cyklů týdně. Rychle by degradovala a bylo by nutné články po krátké době měnit. Při zřizování projektu by bylo nutné zvážit využití fondu na obnovu baterií. Pro případ havárie by musel být elektrolyt zajištěn, aby nebylo ohroženo okolí.

Jako poslední zástupce je lithiová technologie, která se i přes vyšší pořizovací cenu hodí pro tuto specifickou aplikaci, a to z následujících důvodů: baterie využívající lithium disponuje dostatečně velkou cyklickou životností, velkou energetickou hustotou a taktéž dosahuje největší účinnosti oproti předchozím akumulačním článkům. Pro využití za účelem poskytování podpůrné služby **navrhuji využití lithiové baterie**. Konkrétně baterii využívající technologii LiFePO₄. Baterie Li-Ion nedoporučuji z důvodu možného vzplanutí a způsobení požáru. Mou volbu podporuje i fakt, že baterie založené na lithiu jsou dnes hojně nasazované za účelem poskytování SVR.

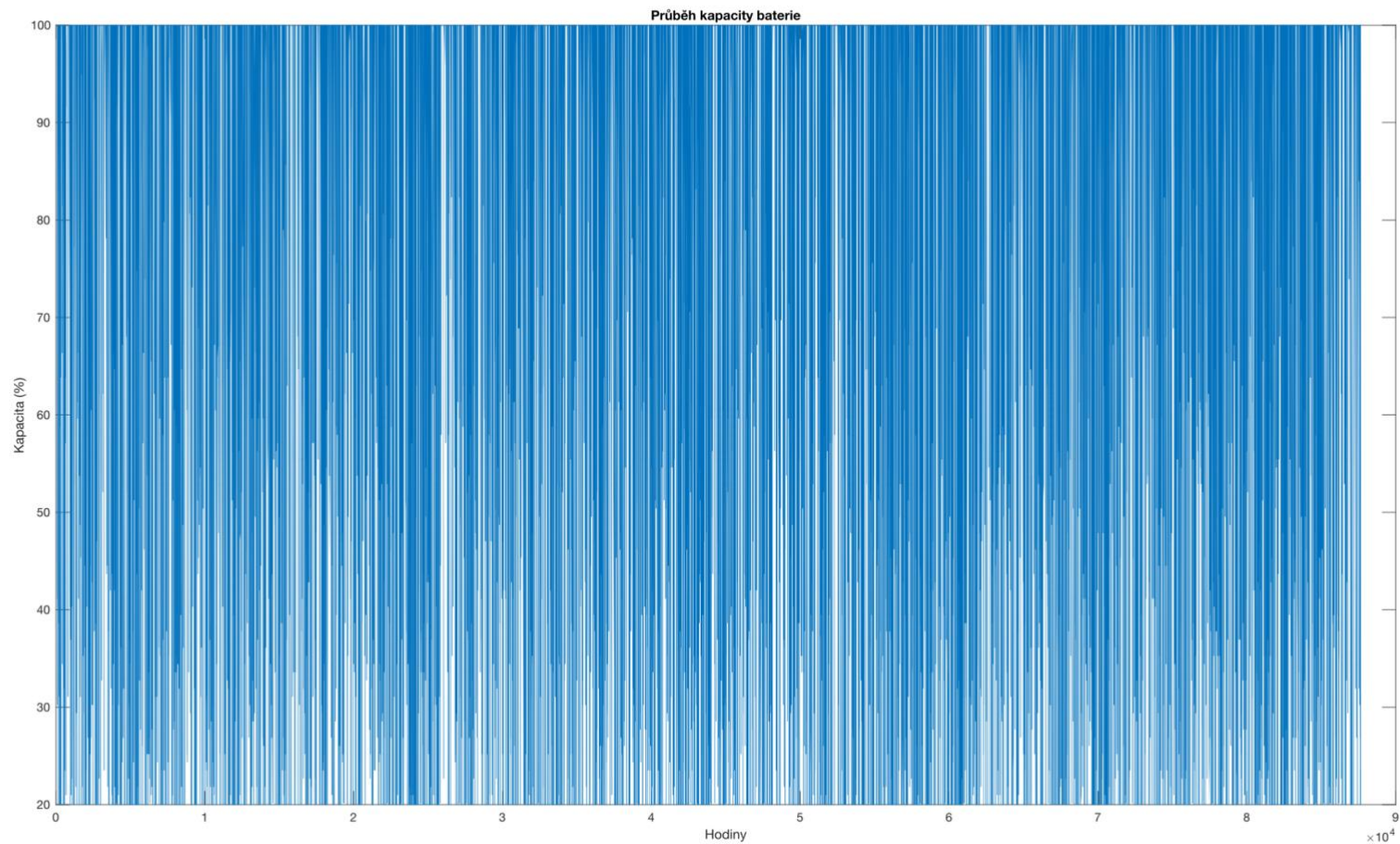
Lithiovou baterii s kapacitou o velikosti 9,5 MWh lze při dnešním technologickém pokroku a poznání vyrobit. Problém nastává až tehdy, kdy je baterie vybíjena pod hranici kapacity 20 %, kdy dochází k degradaci baterie. Jistý případ poklesu kapacity LFP baterie je možné si prohlédnout na Obr. 24. Proto z důvodu rezervy volím baterii s kapacitou 11,9 MWh.



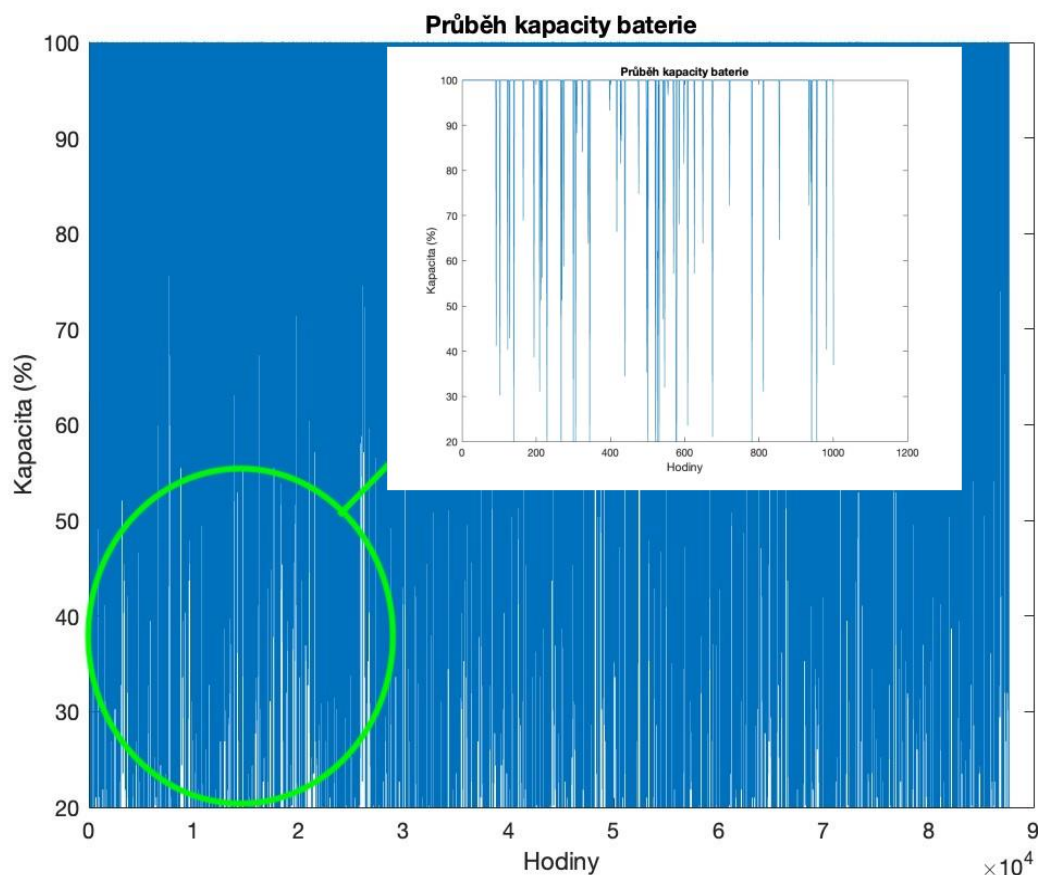
Obr. 24: Závislost kapacity a počtu cyklů pro LiFePO₄ baterii [43]

5.3 Průběh stavu baterie

Pro hodnoty jsem vytvořil jednoduchý skript, který umožňuje nabíjet a vybíjet baterii. Simulace porovnávala dodanou energii zálohou, pokud byla menší nežli kapacita baterie, baterie poskytla energii (vybila se). Naopak pokud byla hodnota energie vyšší nebo 0 než kapacita, baterie se mohla nabíjet. Simulaci jsem udělal tak, aby baterie byla vybíjena do max SoC 80 %. To tedy naznačuje, proč jsem zvolil kapacitu 11,9 MWh – aby mohla baterie pokrýt co největší počet hodnot energie do 9,5 MWh. Nabíjecí konstantu jsem zvolil 0,5C, to znamená, že se baterie nabije z téměř nulové kapacity do plné za dobu dvou hodin. Průběh stavu baterie simulované na datech za posledních 10 let je možné si prohlédnout na Obr. 25, případně na Obr. 26, na kterém je znázorněna kapacita s detailnější křivkou nabíjení a vybíjení.



Obr. 25: Průběh stavu baterie



Obr. 26: Průběh kapacity baterie s detailem

Na základě simulace jsem vypočítal počet aktivací, resp. počet cyklů baterie, která nabyla průměrných hodnot za jeden rok 700 cyklů, přičemž dodaná energie za jednu aktivaci byla 5,65 MWh. Z počtu cyklů vyplývá doba životnosti systému na 12,14 let. Při hodnocení budu uvažovat provoz na 12 let. Při dodržení podmínek stanovených výrobcem (provozní teplota, kvalitní údržba apod.).

5.4 Předpoklady pro návrh

Pro výpočet jsou přijaty následující zjednodušující předpoklady:

- Pojem *akumulace v režimu stand-alone* je zaveden v české legislativě (EZ),
- poskytování zálohy aFRR pomocí BESS je stanoveno v Kodexu PS,
- energie na dobíjení systému není zpoplatněna,
- BESS splňuje všechny podmínky pro provoz, nedochází tedy k porušení smluvní dohody mezi poskytovatelem a ČEPS, a tudíž nejsou stanoveny pokuty za porušení podmínek (systém je k dispozici po celkovou domluvenou dobu),
- platba za rezervovaný výkon se vztahuje k reálně době poskytování zálohy,

- o baterie bude poskytovat pouze hodnoty energií, které jsou menší než instalovaná kapacita. Jiné výkony bude muset Provozovatel PS obstarávat od jiných poskytovatelů.

5.5 Ekonomické hledisko

Dále se ve studii budu zabývat ekonomickým hodnocením navrženého systému. Po konzultaci s odborníkem z oblasti bateriových systémů jsem zjistil, že v případě velkých úložišť vychází cena baterií, střídače a řídicího systému v přepočtu na 475 €/kWh, což při aktuálním kurzu **23,7 Kč/€** vychází momentálně na **11 260 Kč/kWh**. V následujících letech lze očekávat menší částku z důvodu klesající ceny řídicí elektroniky a také baterií díky neustálému vývoji. Ve výpočtu nebudu uvažovat následný prodej baterií ani výměnu střídačů. Nastává tedy otázka, co udělat s bateriemi, které budou na kraji své životnosti. Tento problém lze vyřešit jejich využitím jako *secondary-life* baterie (4.6) nebo jejich následnou likvidací. Cenovku **nákladů** jsem zvolil dle firmy *C-Energy s.r.o.* na **220 000 Kč** za každou instalovanou MWh. Tato částka v sobě zahrnuje náklady na celkovou údržbu včetně revizí. Dále do ekonomického návrhu nebudu započítávat náklady na pořízení, instalaci a údržbu adekvátního transformátoru.

Poskytovateli, jenž poskytuje zálohu aFRR (bývalá SR) je uhrazena částka za **rezervovaný výkon** za hodinu poskytnuté zálohy a také cena za **dodanou RE** za každou dodanou MWh. Cena RE je dle OTE stanovena na **9 672,43 Kč/MWh**, cena RZ je dle ČEPS stanovena na **3 611,95 Kč/MW·h** při dlouhodobém kontraktu. Baterie za rok dodá 3955 MWh, čemuž odpovídá platba za **RE 38 641 327,85 Kč** a za rezervovaný výkon při poskytování služby **15 043 771,8 Kč/rok**. Celkové náklady na údržbu činí ročně **2 618 000 Kč**. Celková výnosnost projektu za rok **53 685 099,65 Kč**. Pro snazší výpočet budu uvažovat čistý příjem 53 500 000 Kč. Ve výpočtu zahrnu i inflaci.

Dále budu uvažovat i následující náklady uvedené na Tab. 6. A taktéž demonstrativně zvolím indexaci nákladů 4 %.

Tab. 6: Náklady

Náklady na projekční činnost	56 000 Kč
Vedení projektu	230 000 Kč
<i>Inženýring</i> (projednávání a zajištění povolení, organizace práce, zápisy, stavební deník apod.)	225 000 Kč
Stavební prostředky (výkopové práce, lávky pro kabely)	550 000 Kč

Elektroinstalace (transformátory, NN, VN trafostanice, ochrany apod.)	31 500 000 Kč
Zajištění projektu (pojištění, bankovní záruky, financování, právní podpora)	1 000 000 Kč
Logistická činnost (dovoz zařízení, odvoz sutě apod.)	560 000 Kč
Celkové náklady na výstavbu	34 121 000 Kč

Tab. 7: Vstupní parametry pro ekonomické hodnocení

Kapacita/výkon	11,9 MWh/5,95 MW
Použitá technologie	LiFePO ₄
Celková investiční náročnost	168 115 000 Kč
Náklady na provoz (fixní)	2 618 000 Kč
Celková výnosnost	53 500 000 Kč
Jednotková cena	14 127,31 Kč/kWh

5.6 Zhodnocení

Tab. 8: Zhodnocení navrženého systému

Vnitřní výnosové procento (VVP, IRR)	14,05 %
Doba návratnosti	7,3 let/ diskontovaná – 8 let
Čistá současná hodnota (NPV)	274 732 042,35 Kč

Díky vysokým cenám za RE a RZ dosáhl systém s kapacitou doby návratnosti osmi let s VVP 14 %. To je doba, která jistě přiměje firmy investovat. Nutno podotknout, že náklady na výstavbu systému jsou orientační, může se díky odlišným částkám měnit. Částky jsem čerpal z poskytnutých materiálů výše zmíněné společnosti. Výčet nákladů jistě není kompletní, daly by se započítat i jiné položky týkající se komunikace, softwarového vybavení apod. Nejdůležitějším poznatkem je **rentabilitnost** systému. Vysoké částky za RE a RZ jsou způsobeny faktory vyplývající z činnosti státu evropské unie. Ve Francii dochází k odstávkám jaderných elektráren, které jsou schopny energii vyrobit levněji. Dochází ke zdražování emisních povolenek v rámci „evropské emisní neutrality“ a také rostoucí instalované výkony OZ, které jsou schopny vyrábět energii jen za určitých podmínek (povětrnostní podmínky a sluneční den). Tyto fakty jsou následně promítnuty celkové ceny elektrické energie.

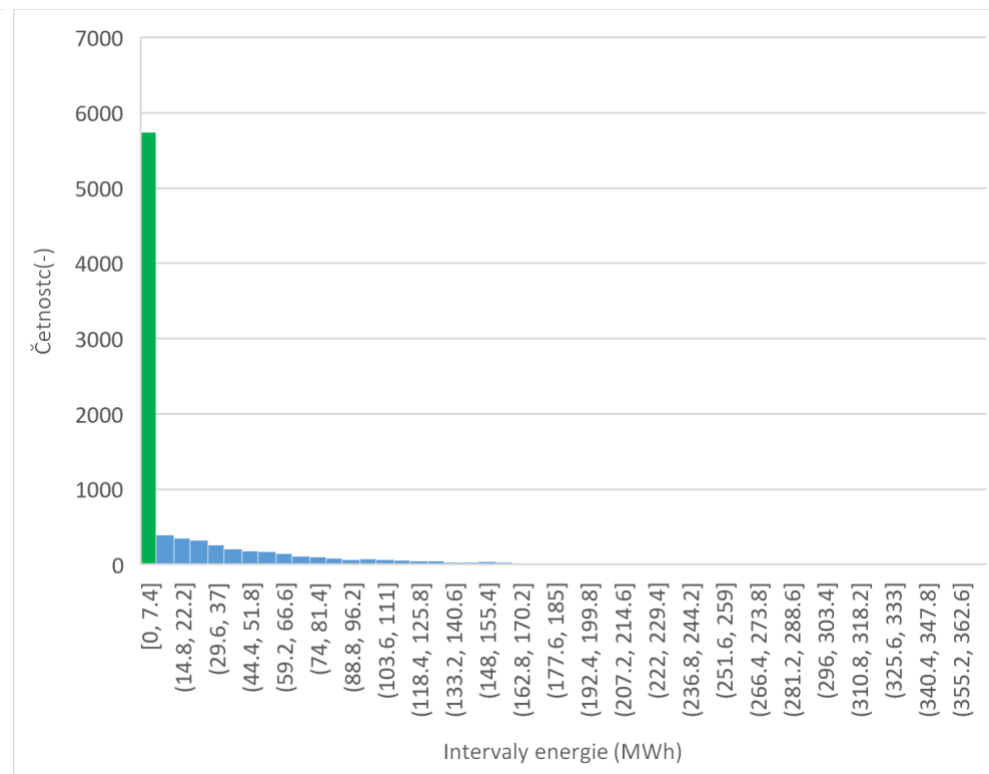
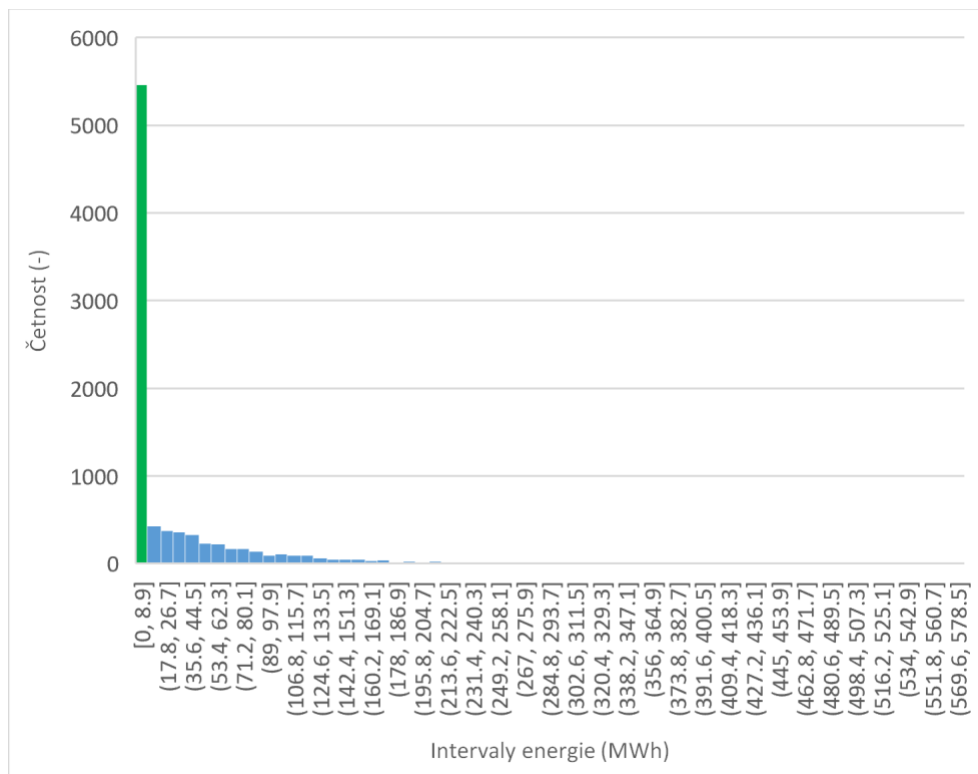
Závěr

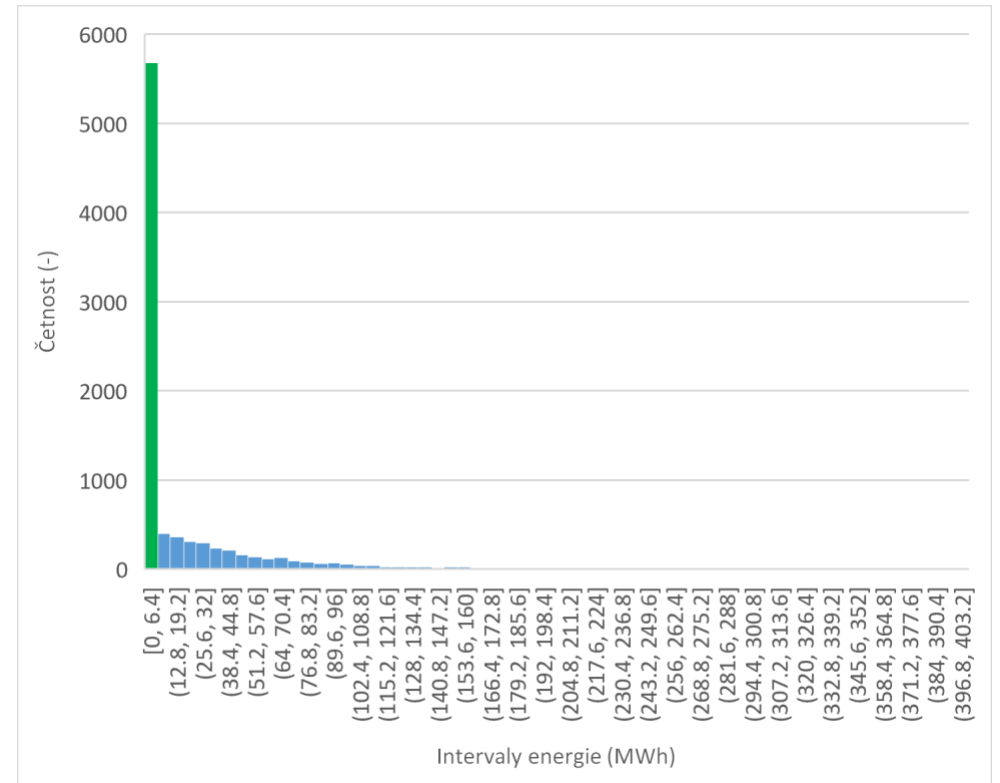
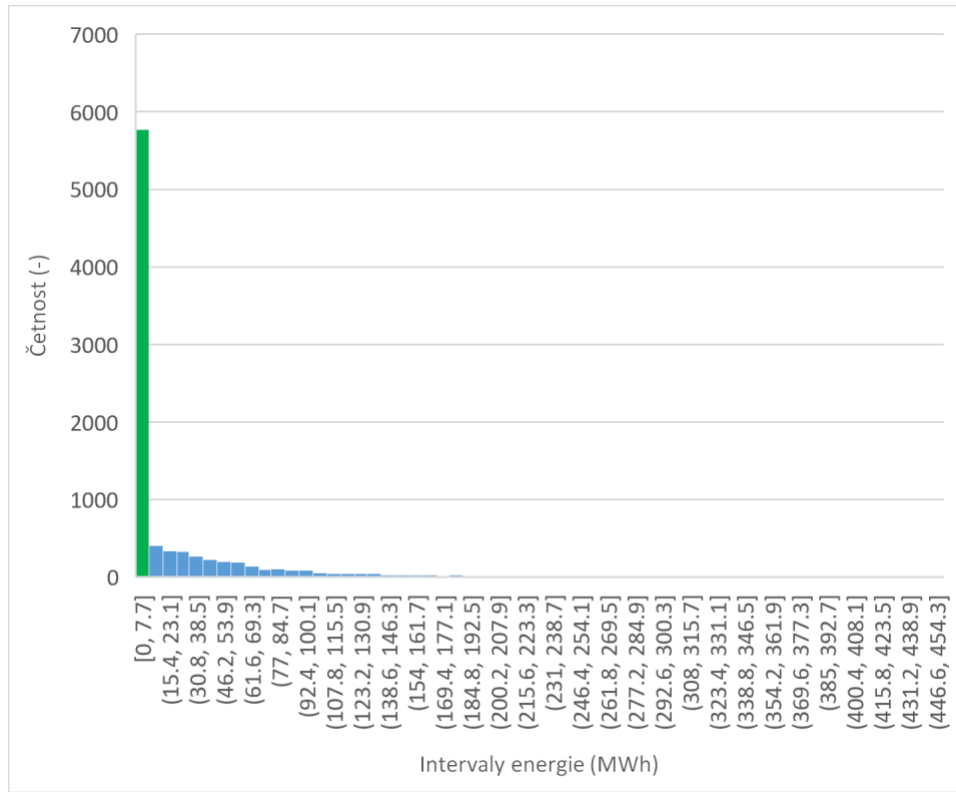
Cílem bakalářské práce byl průzkum uplatnění bateriových úložišť pro síťové podpůrné služby v rámci současných technologických a legislativních bodů. Práce se zaměřila na analýzu vhodnosti jednotlivých bateriových technologií pro aspekty řízení energetické sítě. Na základě studia a konzultace s velkými firmami bylo zjištěno, že bateriová úložiště skrývají značný potenciál pro stabilní chod elektrické sítě nejen u nás, ale i po celém světě. Tomuto tvrzení přispívá i fakt stále větších instalovaných kapacit bateriových úložišť (v Evropě stále více roste). Instalované výkony bateriových úložišť by měly do roku 2040 dosáhnout 1000 GW. Různé studie ale ukazují, že do roku 2050 by měla význam bateriových článků překonat technologie vodíku. V současné době se o něm ale spekuluje zřídka, dle mě ještě tato technologie není na takové úrovni jako právě baterie.

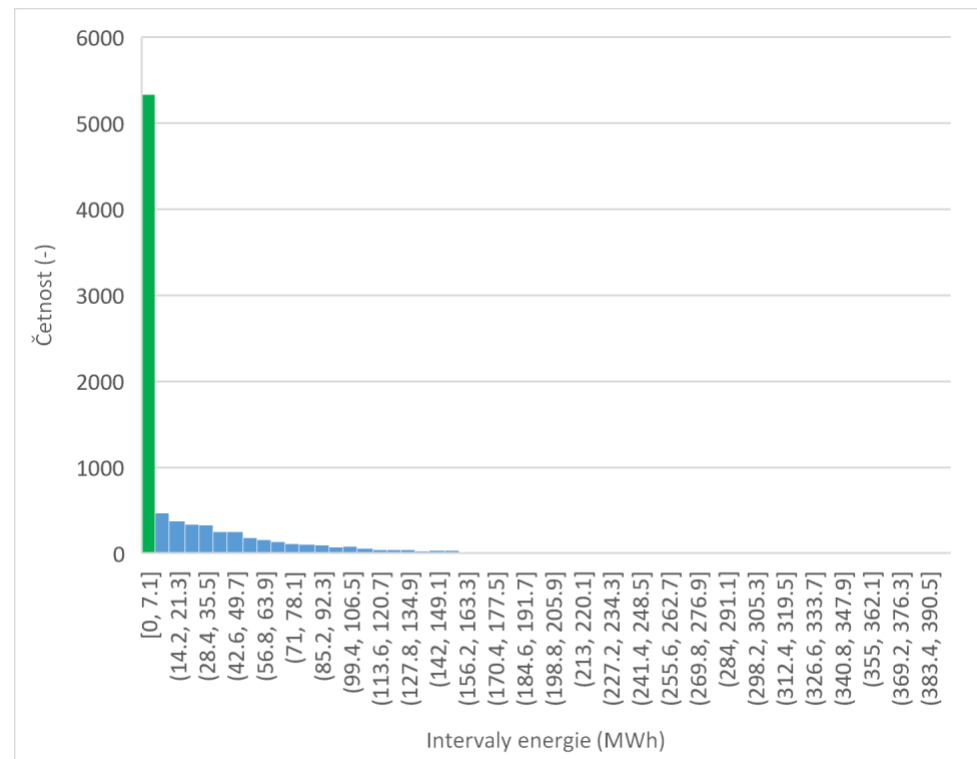
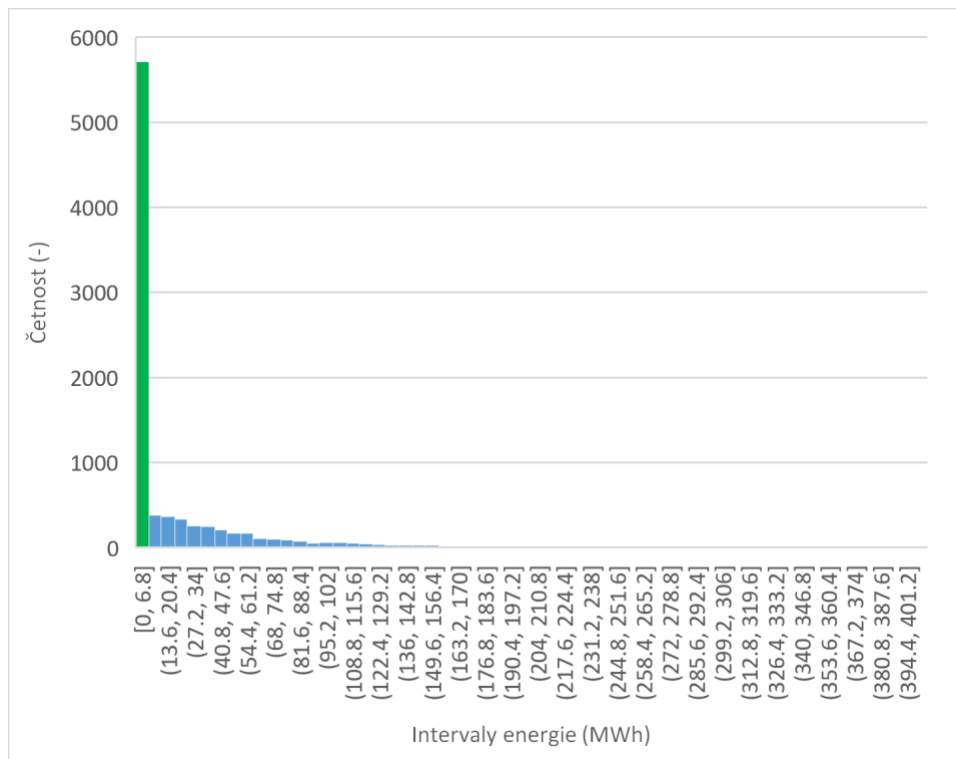
Ideální stav energie by v síti mezi výrobou a spotřebou měl být vyvážený. Vzhledem k Evropské unii a její cestě k emisní neutralitě se celá problematika akumulace stává čím dál tím aktuálnější. Musí se tedy zvolit vhodná cesta na poli akumulace. Jak by mělo z této práce vyplynout, bateriové systémy jsou jedním z nadějných prostředků pro vyřešení problému. Nicméně v současné době není energetická legislativa ČR plně připravena na příchod bateriových úložišť, i přes tento fakt jsou v ČR momentálně projekty poskytující podpůrné služby žádané a majitelé těchto úložišť si jejich provoz pochvalují. To můžu konstatovat díky konzultaci s Ing. Lubomírem Kohoutem ze SUAS Group s.r.o a Ing. Josefem Havlíkem z firmy C-Energy.

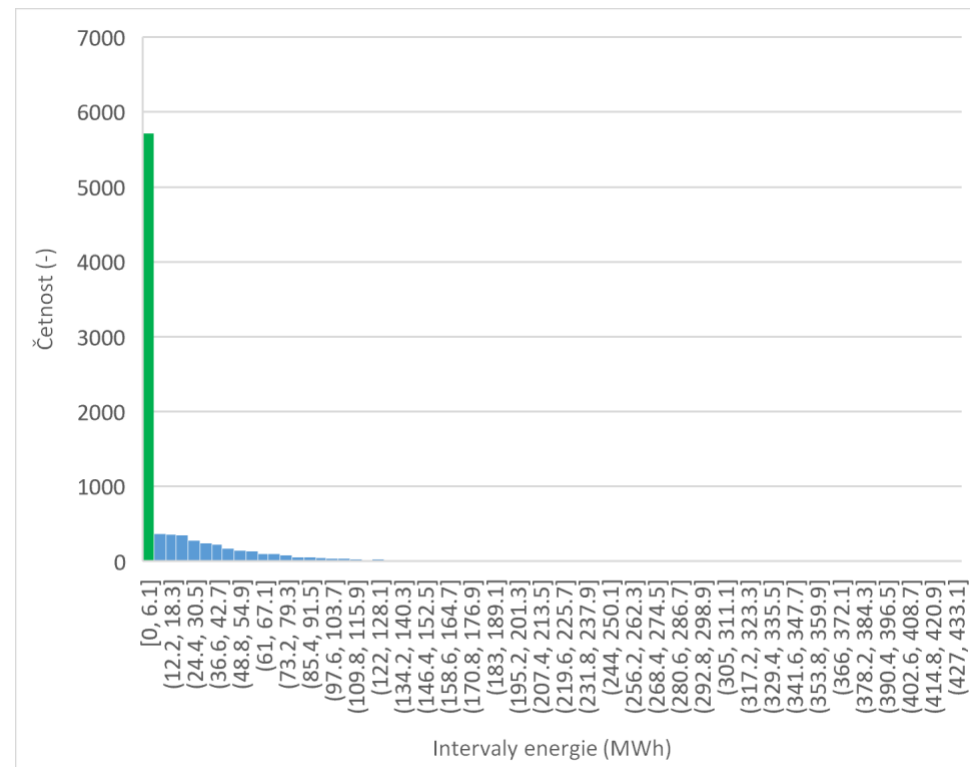
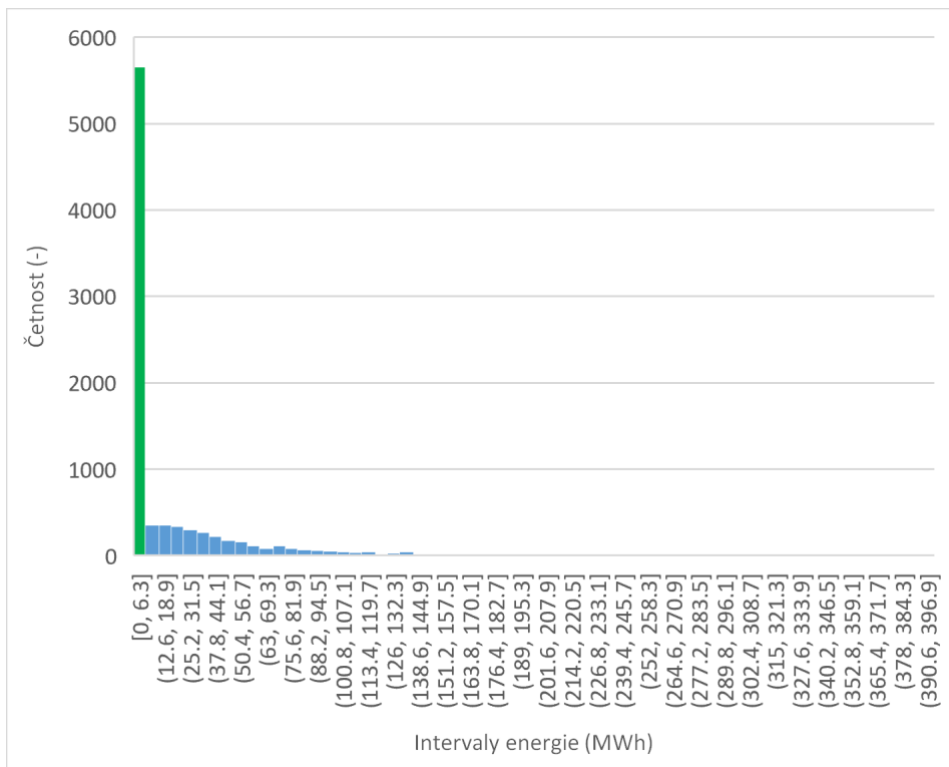
Jako poslední bod práce jsem uvedl demonstrativní případ návrhu velkokapacitního úložiště využívající lithiovou baterii s kapacitou 11,9 MWh pro poskytování zálohy pro regulaci výkonové rovnováhy s automatickou aktivací. Pro účely bakalářské práce jsem zavedl zjednodušující úvahy a vypočítal jsem investici jako rentabilní.

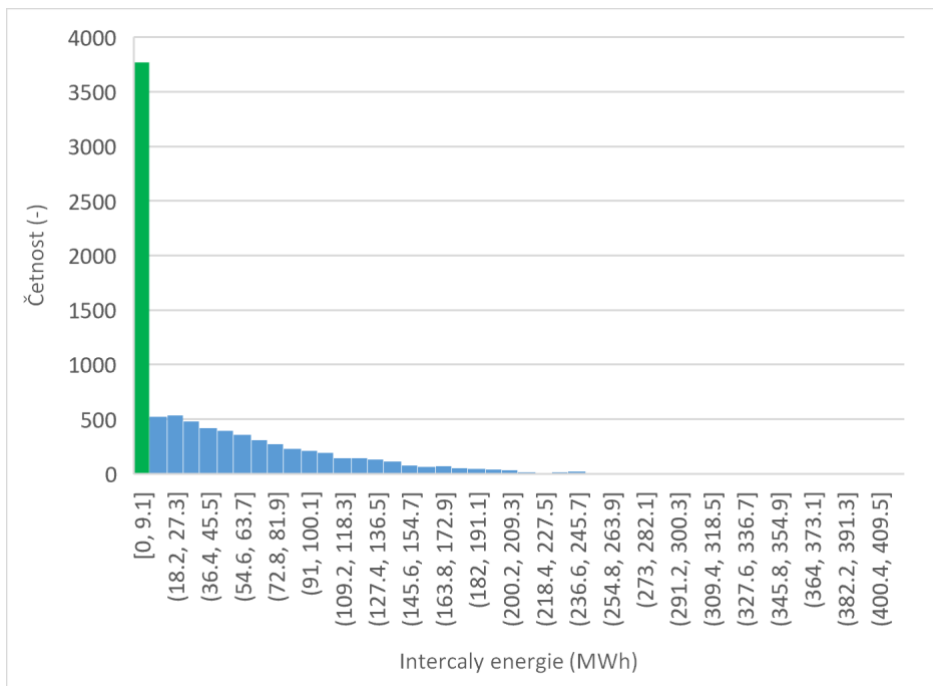
Přílohy











Literatura

- [1] „Informační portál". <https://www.informacni-portal.cz/clanek/podpurne-sluzby#article-top> (viděno 15. květen 2023).
- [2] „Informační portál". <https://www.informacni-portal.cz/clanek/prenosova-soustava#article-top> (viděno 12. květen 2023).
- [3] „ČEPS, a.s." <https://www.ceps.cz/cs/kodex-ps> (viděno 12. květen 2023).
- [4] „Pravidla provozování přenosové soustavy KODEX PŘENOSOVÉ SOUSTAVY-ČÁST II. Podpůrné služby (PpS)".
- [5] „Pravidla provozování přenosové soustavy KODEX PŘENOSOVÉ SOUSTAVY-ČÁST I. Základní podmínky pro užívání přenosové soustavy".
- [6] „Evropská síť provozovatelů přenosových soustav elektřiny (ENTSO-E)". <https://oenergetice.cz/elektrina/evropska-sit-provozovatelu-prenosovych-soustav-elektriny-entso-e> (viděno 12. květen 2023).
- [7] „ČEPS, a.s." <https://www.ceps.cz/cs/systemove-sluzby> (viděno 12. květen 2023).
- [8] „Member Companies". <https://www.entsoe.eu/about/inside-entsoe/members/> (viděno 12. květen 2023).
- [9] „ČEPS, a.s." <https://www.ceps.cz/cs/podpurne-sluzby> (viděno 12. květen 2023).
- [10] „ČEPS, a.s." <https://www.ceps.cz/cs/statistiky-svr> (viděno 25. květen 2023).
- [11] „Droop curve used for frequency regulation experiments | Download Scientific Diagram". https://www.researchgate.net/figure/Droop-curve-used-for-frequency-regulation-experiments_fig4_303797615 (viděno 15. květen 2023).
- [12] „Pravidla provozování přenosové soustavy KODEX PŘENOSOVÉ SOUSTAVY-ČÁST V. Bezpečnost provozu a kvalita na úrovni PS".
- [13] „Využitelnost agregované flexibility pro řízení ES ČR | allforpower.cz". <https://allforpower.cz/rozvody-energii/vyuzitelnost-agregovane-flexibility-pro-rizeni-es-cr-176> (viděno 12. květen 2023).
- [14] X. Luo, J. Wang, M. Dooner, a J. Clarke, „Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation", *Appl Energy*, roč. 137, s. 511–536, led. 2015, doi: 10.1016/J.APENERGY.2014.09.081.
- [15] „Cykly a životnost baterie - TZB-info". <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektriny/21096-cykly-a-zivotnost-baterie> (viděno 12. květen 2023).
- [16] „BU-402: What Is C-rate? - Battery University". <https://batteryuniversity.com/article/bu-402-what-is-c-rate> (viděno 13. květen 2023).
- [17] „Hloubka vybití baterie - Schlieger". <https://www.schlieger.cz/slovník/hloubka-vybiti-baterie/> (viděno 12. květen 2023).
- [18] „Depth Of Discharge (DOD) - Batteries Online". <https://batteriesonline.co.za/depth-of-discharge-dod/> (viděno 23. květen 2023).
- [19] David. Linden a T. B. Reddy, *Handbook of batteries*. McGraw-Hill, 2002.
- [20] „Handbook on Battery Energy Storage System", Manila, Philippines, pro. 2018. doi: 10.22617/TCS189791-2.
- [21] „SLI Battery? What is an SLI Battery. Find out!" <https://www.upsbatterycenter.com/blog/what-is-an-sli-battery/> (viděno 12. květen 2023).
- [22] S. Schwimmbeck, M. Baumann, a H. G. Herzog, „State of Charge Degradation of AGM Starter Batteries in Automotive Power Nets", in *2020 15th International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies, EVER 2020*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., zář. 2020. doi: 10.1109/EVER48776.2020.9242997.

- [23] Petr Musil, „FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY SLEDOVÁNÍ VLIVU TEPLoty NA VLASTNOSTI OLOVĚNÝCH AKUMULÁTORŮ MONITORING OF TEMPERATURE INFLUENCE ON PROPERTIES OF LEAD-ACID ACCUMULATORS DIPLOMOVÁ PRÁCE". [Online]. Dostupné z: <http://latex.feec.vutbr.cz>
- [24] M. (Masaki) Yoshio, R. J. Brodd, a A. Kozawa, „Yoshio M., Brodd R.J., Kozawa A. (eds.) Lithium-ion batteries (Springer, 2009)(ISBN 0387344446)(O)(460s) Ch", č. Isbn 0387344446, s. 452, 2009, Viděno: 12. květen 2023. [Online]. Dostupné z: https://books.google.com/books/about/Lithium_Ion_Batteries.html?hl=cs&id=mxOfAQAACAAJ
- [25] „Bateriové systémy pro stacionární úložiště energie", 2018.
- [26] „About the LFP Battery - First Phosphate". <https://firstphosphate.com/phosphate-industry/about-the-lfp-battery/> (viděno 13. květen 2023).
- [27] „About NAS Batteries | Products | NGK INSULATORS, LTD." <https://www.ngk-insulators.com/en/product/nas-about.html> (viděno 12. květen 2023).
- [28] „Sodíkové baterie - konstrukce, princip činnosti a aplikace". <https://oenergetice.cz/elektrina/sodikove-baterie-konstrukce-princip-cinnosti-a-aplikace> (viděno 12. květen 2023).
- [29] M. Vins a M. Sirovy, „Sodium-sulfur batteries for energy storage applications", *Proceedings of the 2019 20th International Scientific Conference on Electric Power Engineering, EPE 2019*, kvě. 2019, doi: 10.1109/EPE.2019.8778134.
- [30] E. Sánchez-Díez *et al.*, „Redox flow batteries: Status and perspective towards sustainable stationary energy storage", *J Power Sources*, roč. 481, s. 228804, led. 2021, doi: 10.1016/J.JPOWSOUR.2020.228804.
- [31] „Průtokové baterie před prahem singularity: část 1". <https://www.hybrid.cz/prutokove-baterie-pred-prahem-singularity-cast-1/> (viděno 23. květen 2023).
- [32] „Jak snížit účty za elektřinu s pomocí bateriového úložiště - YouTube". <https://www.youtube.com/watch?v=P6JJiJq7ZFM> (viděno 18. květen 2023).
- [33] „Juraj Kosek - Ukládání elektřiny z obnovitelných zdrojů do baterií a průtočných baterií - YouTube". <https://www.youtube.com/watch?v=P4YzmBwvtC0&t=456s> (viděno 18. květen 2023).
- [34] L. Kohout, „Kick-off projektu BESS C-Energy II".
- [35] „Second Life - EA Elektro-Automatik". <https://elektroautomatik.com/en/industries/battery-recycling/second-life/> (viděno 12. květen 2023).
- [36] „458/2000 Sb. Energetický zákon". <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2000-458> (viděno 12. květen 2023).
- [37] „Luděk Niedermayer". <https://www.niedermayer.cz/o-eu-a-cr-v-ni/articles/zimni-balicek-cista-energie-dostupna-pro-vsechny-evropany> (viděno 13. květen 2023).
- [38] M. Šilar, „Bateriová akumulace v rámci služeb výkonové rovnováhy".
- [39] „Dlouho očekávaný energetický zákon má být v prosinci, obor se jím bude řídit od ledna 2024 - Ekonomický deník". <https://ekonomickydenik.cz/ocekavany-novy-energeticky-zakon-ma-byt-v-prosinci-obor-se-jim-bude-ridit-od-ledna-2024/> (viděno 12. květen 2023).

- [40] „Tušimická baterie v testování obstála | Skupina ČEZ - O Společnosti".
<https://www.cez.cz/cs/pro-media/tiskove-zpravy/tusimicka-baterie-v-testovani-obstala-139511> (viděno 12. květen 2023).
- [41] „TheBattery | Alfen N.V." <https://alfen.com/energy-storage/thebattery> (viděno 12. květen 2023).
- [42] „Avoid high peak loads in industrial companies". <https://intilion.com/en/peak-shaving/> (viděno 12. květen 2023).
- [43] „Does LiFePO4 Battery Cycle Life Matter?" <https://batteryfinds.com/does-lifepo4-battery-cycle-life-matter/> (viděno 14. květen 2023).

Seznam obrázků

Obr. 1: Schéma ES	- 12 -
Obr. 2: Vývoj velikosti výkonu pro FCR.....	- 19 -
Obr. 3: Příklad statiky FCR [10].....	- 19 -
Obr. 4: Budoucí vývoj doby plného náběhu pro aFRR.....	- 20 -
Obr. 5: Postupné nasazování služeb při odchylce frekvence [12]	- 23 -
Obr. 6: Možnosti akumulace elektrické energie [13].....	- 24 -
Obr. 7: Porovnání parametrů DoD a SoC [17].....	- 27 -
Obr. 8: Řez olověným akumulátorem [22]	- 29 -
Obr. 9: Strukturální schéma LFP baterie [25].....	- 30 -
Obr. 10: Průřez NaS článkem vyvíjeným spol. NGK-Insulators [26]	- 31 -
Obr. 11: Strukturální schéma RFB akumulátoru [30].....	- 32 -
Obr. 12: Porovnání jednotlivých bateriových technologií pomocí paprskového grafu [13], [18]-	33 -
Obr. 13: Konkrétní stavba rackového úložiště [33]	- 35 -
Obr. 14: Proces využívání bateriových článků [34].....	- 36 -
Obr. 15: Možnosti využití úložiště.....	- 38 -
Obr. 16: Graf znázorňující poskytování FCR pomocí úložiště [33]	- 39 -
Obr. 17: Užití BESS u FVE [33].....	- 41 -
Obr. 18: Příklad <i>Peak-shavingu</i> [41]	- 42 -
Obr. 19: SWOT analýza bateriových úložišť.....	- 43 -
Obr. 20: Ukázka dat v Excelu	- 44 -
Obr. 21: Histogram intervalů energií pro 1. rok	- 45 -
Obr. 22: Průběh aktivací aFRR+ pro jednotlivé roky	- 46 -
Obr. 23: Průběh aktivací aFRR+ pro jednotlivé roky	- 47 -
Obr. 24: Závislost kapacity a počtu cyklů pro LiFePO ₄ baterii [42]	- 49 -
Obr. 25: Průběh stavu baterie.....	- 50 -
Obr. 26: Průběh kapacity baterie s detailem	- 51 -

Seznam tabulek

Tab. 1: Jednotlivé části Kodexu PS	- 13 -
Tab. 2: Ceny SVR při dlouhodobém kontraktu	- 16 -
Tab. 3: Přehled jednotlivých služeb, výkonů a FAT.....	- 21 -
Tab. 4: Přehled hodnot pro jednotlivé bateriové technologie [13], [18].....	- 34 -
Tab. 5: Nejčtetnější intervaly pro jednotlivé roky	- 45 -
Tab. 6: Náklady.....	- 52 -
Tab. 7: Vstupní parametry pro ekonomické hodnocení.....	- 53 -
Tab. 8: Zhodnocení navrženého systému.....	- 53 -