



**ZÁPADOČESKÁ
UNIVERZITA
V PLZNI**

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY A STROJŮ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Využití aktuálních technologií akumulace elektrické energie provozovatelem
distribučních sítí

AUTOR PRÁCE: Jakub Vokurka
VEDOUcí PRÁCE: Ing. Václav Mužík, Ph.D.
KONZULTANT PRÁCE: Ing. Milan Jelínek

PLZEŇ 2021

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Jakub VOKURKA**
Osobní číslo: **E18B0111P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Téma práce: **Využití aktuálních technologií akumulace elektrické energie provozovatelem distribučních sítí**
Zadávací katedra: **Katedra výkonové elektroniky a strojů**

Zásady pro vypracování

1. Analyzujte technické požadavky distribuční sítě s ohledem na aktuální problematiku akumulace elektrické energie.
2. Identifikujte na dostupných datech z provozu situace, které jsou vhodné pro použití akumulace.
3. Proveďte technicko ekonomický návrh instalace akumulace pro zvolenou typovou oblast.
4. Diskutujte další možné využití akumulace například v lokálních distribučních soustavách, ve vztahu k elektromobilitě a dalším zvoleným tématům.

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

Seznam doporučené literatury:

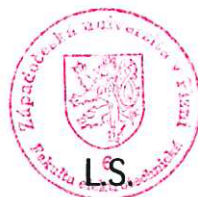
1. Pravidla provozování distribuční soustavy 2019.
2. Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejné distribuční sítě (ČSN EN 50160.)

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Václav Mužík, Ph.D.**
Regionální inovační centrum elektrotechniky

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



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





Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá problematikou akumulačních zařízení v distribuční síti, konkrétně použitím bateriového úložiště pro napájení dobíjecí stanice pro elektromobilitu. V práci jsou nastíněny možnosti využití akumulace elektrické energie v distribuční síti. Práce také obsahuje shrnutí legislativního prostředí pro využití akumulačních technologií na území České republiky. Praktická část se věnuje návrhu kapacity bateriového úložiště pro elektronabíjecí stanici v oblastech s nedostatečnou velikostí výkonu přípojky k distribuční síti. Obsahuje simulaci vyplývající z reálných dat získaných z měření.

Klíčová slova

baterie, akumulace, elektromobilita, distribuční síť, nabíjení, stanice

Abstract

Jakub, Vokurka . *Use of current energy storage technologies for specific purposes of distribution system operators [Vyžití aktuálních technologií akumulace elektrické energie provozovatelem distribučních sítí]*. Pilsen, 2021. Bachelor thesis (in Czech). University of West Bohemia. Faculty of Electrical Engineering. Department of Electrical Power Engineering and Environmental Engineering. Supervisor: Ing. Václav Mužík, Ph.D.

The bachelor's thesis deals with the topic of storage devices in the distribution network, specifically the use of battery storage to power the charging station for electromobility. The work outlines the possibilities of using the accumulation of electricity in the distribution network. The work also contains a summary of the legislative environment for the use of storage technologies in the Czech Republic. The practical part is devoted to the design of battery storage capacity for a charging station in areas with insufficient power. It contains a simulation resulting from real data obtained from measurements.

Keywords

battery, accumulation, electromobility, distribution network, charging, station

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem svou závěrečnou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské 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 bakalářské 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 následujícího autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 270 trestního zákona č. 40/2009 Sb.

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

V Plzni dne 27. května 2021

Jakub Vokurka



.....
Podpis

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Václavu Mužikovi, Ph.D. a konzultantovi ze společnosti ČEZ Distribuce, a. s. Ing. Milanu Jelínkovi za jejich přístup, metodické pokyny a cenné profesionální rady, které vedly k vypracování této bakalářské práce.

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk	vii
Seznam obrázků	viii
Seznam tabulek	ix
Úvod	1
1 Teoretický úvod	2
1.1 Distribuce elektrické energie	2
1.1.1 Diagram zatížení (DZ)	3
1.2 Využití akumulace v elektrizační soustavě	4
1.2.1 Grid Balancing - Nedostatek nebo přebytek výkonu	4
1.2.2 Zlepšení kvality elektrické energie v síti	5
1.2.3 Záloha distribuční transformační stanice	6
1.2.4 Vyhlazení křivky výroby a zátěže (Smoothing)	6
1.3 Dopad elektromobility na DS	7
1.4 Bateriové systémy skladování energie BESS	8
1.4.1 Základní parametry	8
1.4.2 Typy bateriových systémů	10
1.4.3 Struktura úložiště	12
1.4.4 Provoz lithium iontového bateriového úložiště	14
1.5 Způsoby zapojení BESS v distribuční síti	17
1.6 Technické požadavky distributora na akumulaci	18
1.7 Legislativa v České republice	20
2 Popis provozních stavů	23
2.1 Analýza dat	23
2.2 Vyhodnocení provozních stavů vhodných pro použití akumulace	25
2.3 Nasazení bateriového úložiště - simulační model provozu	26
2.4 Zhodnocení	32
3 Technickoekonomický návrh	33
3.1 Parametry navrhovaného řešení	33
3.1.1 Výkon sítě 22kW	34
3.1.2 Výkon sítě 33kW	36
3.1.3 Výkon sítě 44kW	37

3.2	Ztráty	38
3.3	Cena elektrické energie	39
3.4	Ekonomický model	39
4	Další možné využití akumulace	41
5	Závěr	43
	Seznam použité literatury	46
	Přílohy	A
	Příloha A - Simulační model bateriového úložiště v softwaru MATLAB	A
	Příloha B - Ekonomický model	D

Seznam použitých symbolů a zkratek

AC	Střídavý proud (Alternating current)
BESS	Bateriové systémy skladování energie (Battery Energy Storage System)
BMS	Systém správy baterie (Battery management system)
DC	Stejnoseměrný proud (Direct current)
DTS	Distribuční transformátorová stanice
DS	Distribuční soustava
DDZ	Denní diagram zatížení
ERÚ	Energetický regulační úřad
EV	Plně elektrická vozidla
HDO	Hromadné dálkové ovládání
HEV	Hybridní elektrická vozidla
NN	Nízké napětí 0,4kV
OZE	Obnovitelné zdroje energie
PCS	Power Conversion System (Systém přeměny energie)
PDS	Provozovatel distribuční soustavy
PPDS	Pravidla provozování distribuční soustavy
RTU	Remote Terminal Unit
SCADA	Dozor a sběr dat (Supervisory Control And Data Acquisition)
SVR	Služby výkonové rovnováhy
VN	Vysoké napětí

Seznam obrázků

1.1	Elektrizační soustava [2]	2
1.2	Denní diagram zatížení [3]	3
1.3	Peak-Shaving [5]	5
1.4	Peak-Shifting [5]	5
1.5	Smoothing [7]	7
1.6	Definice SOC a DOD [12]	10
1.7	Struktura úložiště MERUS ESS [14]	13
1.8	Popis různých typů cyklů [11]	14
1.9	Snižování životnosti baterie v závislosti na využití mezi SoC [17]	16
1.10	Zapojení bateriového úložiště do sítě [14]	17
1.11	Připojení výroby s akumulací NN do DS [18]	19
2.1	Denní profil	24
2.2	Poměrné rozdělení výkonových fází	26
2.3	Simulovaný denní průběh baterie	29
2.4	Simulovaný denní průběh baterie při aplikaci mezi SoC	31
3.1	Účinnost bateriového úložiště [22]	38

Seznam tabulek

1.1	Přehled typů baterií [13]	11
1.2	Povolená frekvence [18]	20
2.1	Maxima vybití a počet denních výskytů baterie 100kWh	27
2.2	Maxima vybití a počet denních výskytů baterie 200kWh	27
2.3	Maxima vybití a počet denních výskytů baterie 300kWh	28
2.4	Maxima vybití a počet denních výskytů baterie 400kWh	28
2.5	Maxima vybití a počet denních výskytů baterie 100kWh s limitem SoC	29
2.6	Maxima vybití a počet denních výskytů baterie 200kWh s limitem SoC	30
2.7	Maxima vybití a počet denních výskytů baterie 300kWh s limitem SoC	30
2.8	Maxima vybití a počet denních výskytů baterie 400kWh s limitem SoC	30
2.9	Maxima vybití a počet denních výskytů baterie 500kWh a 600kWh s limitem SoC a výkonem sítě 22kW	31
3.1	Parametry úložiště TPS od TESVOLT [21]	34
3.2	Parametry úložiště TPS 650 [21]	35
3.3	Parametry úložiště TPS 1000 [21]	35
3.4	Parametry úložiště TPS [21]	36
3.5	Parametry úložiště TPS 500 [21]	37
3.6	Ceny za dobíjení ČEZ [24]	39
3.7	Ekonomický model	40
4.1	Využití baterie	42

Úvod

V současnosti roste mimořádným tempem poptávka po elektromobilitě. Jednou z mála nevýhod vlastnictví elektromobilu je jeho krátký dojezd a dlouhé nabíjení. Majitelé vozů chtějí své vozidlo dobít na nabíjecí stanici ideálně okamžitě. S tím jsou spojeny problémy s nedostatečným výkonem v některých z oblastí především distribuční sítě. Řešením tohoto problému tak může být například využití akumulčních zařízení.

V první kapitole této práce jsou popsány různé způsoby využití akumulace v distribuční soustavě. Například vypořádání se s nedostatkem nebo přebytkem výkonu v síti, použití akumulace na zlepšení kvality distribuované elektrické energie nebo záloha distribuční transformační stanice. Je zde popsán také vliv elektromobility na distribuční soustavu. Dále jsou shrnuty základní informace k bateriovým systémům skladování elektrické energie, jako jsou jejich základní parametry, technologie článků nebo struktura takového úložiště. Je zde také popsáno, jak se lithium iontové bateriové úložiště provozuje nebo jak takové úložiště připojit k síti. Poslední část této teoretické kapitoly je věnována legislativě týkající se provozu akumulátorů na území České republiky.

Praktická část této práce a zároveň druhá kapitola je zaměřena na analýzu dat poskytnutých společností ČEZ a. s. o provozu jedné z jejich nejvytíženějších elektronabíjecích stanic. Z těchto dat je vytvořen simulační model bateriového úložiště, které vykrývá výkonové špičky v oblastech, kde je k dispozici různý vstupní výkon. Pomocí tohoto modelu jsou poté vybrána vhodná úložiště. Ve třetí kapitole se pak práce zabývá parametry takových úložišť z reálné dokumentace výrobců a jejich přibližnou technickoekonomickou analýzou. Řeší se zde například návratnost, ztráty a životnost systému.

1 Teoretický úvod

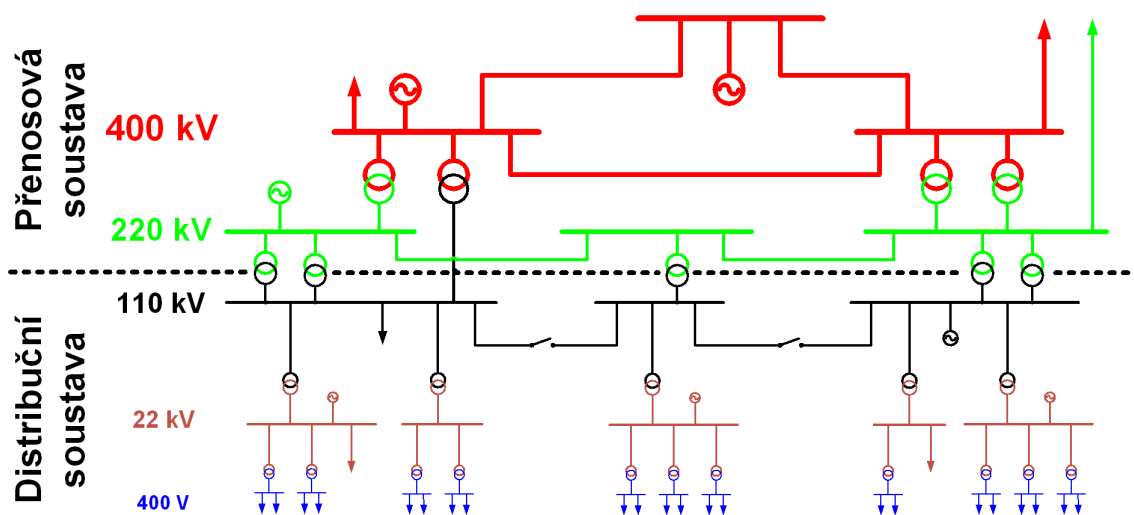
1.1 Distribuce elektrické energie

Elektrizační soustava je systémem zařízení sloužící k zajištění přenosu elektrické energie od zdrojů ke spotřebitelům. Tato energie je tvořena v elektrárnách a dále přenášena ve většině případů do přenosové soustavy, jejímž výhradním provozovatelem v České republice je společnost ČEPS, a.s.. [1]

Přenosová soustava se skládá ze dvou hlavních částí, rozveden a venkovních vedení velmi vysokého napětí (VVN), jež tyto rozvodny spojuje. Vedení VVN je provozováno zejména na dvou napěťových úrovních 400kV a 220kV. K těmto napěťovým hladinám jsou připojené transformovny, které transformují velmi vysoké napětí na úroveň 110kV. Na této napěťové úrovni je energie distribuována k odběratelům pomocí distribučních soustav (DS). [1]

Distribuční soustava slouží k distribuci elektrické energie ke koncovým zákazníkům/spotřebitelům. Na území České republiky je tvořena sítěmi velmi vysokého napětí (110kV), vysokého napětí (35kV, 22kV, 10kV, 6kV) a nízkého napětí 400/230V. Distribuční soustava přenáší výkon na kratší vzdálenosti ke koncovým odběratelům a jsou do ni zapojeny elektrárny nižších výkonů. Distribuční soustavu na našem území provozují společnosti ČEZ Distribuce, a.s., EG.D, a.s. (do roku 2020 známá jako E.ON Distribuce, a.s.) a PREdistribuce, a.s.. [1]

Na obrázku 1.1 je znázorněno rozdělení elektrizační soustavy na přenosovou a distribuční soustavu



Obrázek 1.1: Elektrizační soustava [2]

Další velmi důležitou funkcí elektrizační soustavy je zajistit vyrovnaní výkyvů v síti. To znamená, že z míst kde je elektrické energie v daném okamžiku přebytek, ji odvádí tam, kde je jí nedostatek. Nevyváženost sítě je často způsobována poruchami nebo nepředvídatelnou výrobou obnovitelných zdrojů. Proto je velmi důležité síť pečlivě sledovat. Elektrizační soustava má jen velmi omezenou kapacitu, po-

kud by došlo k jejímu překročení, hrozí lavinový výpadek, který může způsobit blackout. Právě tohoto důvodu existují dispečerská pracoviště, která jsou zodpovědná za kontrolu a ovládání této sítě. [1]

Při distribuci elektrické energie je kladen důraz na[1]:

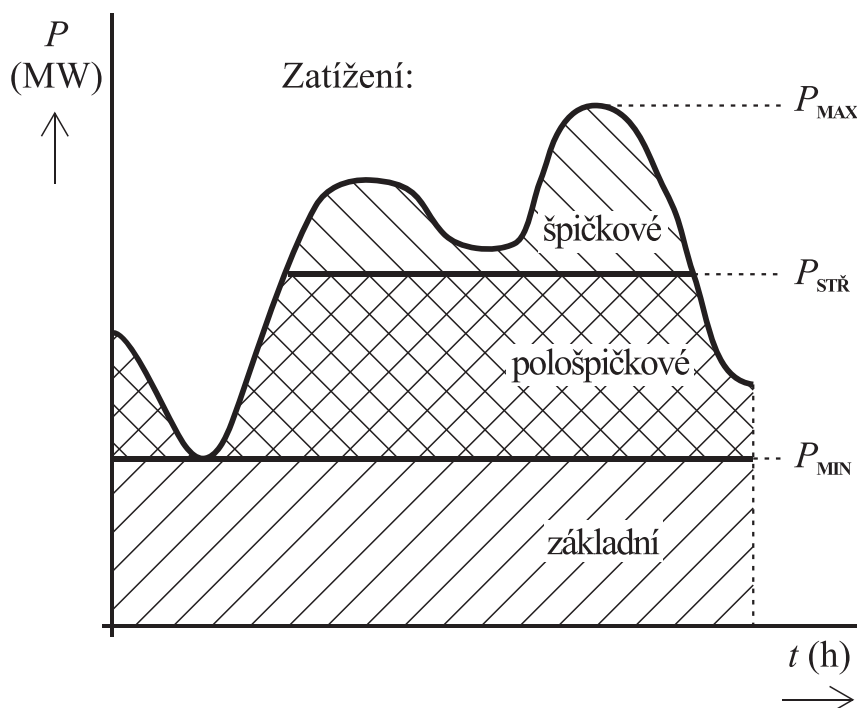
- spolehlivost
- nepřetržitost
- kvalitu

1.1.1 Diagram zatížení (DZ)

Diagram zatížení také odběrový diagram - vyjadřuje průběh výroby (spotřeby) elektrické energie za určitý časový interval. Výroba elektrické energie musí v každém okamžiku odpovídat její spotřebě, možnosti akumulace jsou totiž v současných podmínkách nesnadno uskutečnitelné. Rozlišujeme diagramy denní (DDZ), týdenní (TDZ), měsíční (MDZ) a roční (RDZ). Průběhy těchto diagramů jsou ovlivňovány mnoha vlivy např. klimatickými podmínkami, střídáním ročních období, střídání dne a noci nebo pracovní aktivitou. [3]

DDZ lze rozdělit do tří částí:

- základní zatížení
- pološpičkové zatížení
- špičkové zatížení



Obrázek 1.2: Denní diagram zatížení [3]

Základní zatížení

Jedná se o oblast v DDZ, která je vymezená nulou a minimálním příkonem. Tato hodnota se během dne nemění. Tato oblast je zastoupena zejména elektrárnami, které dodávají do sítě elektrickou energii konstantně a pracují nepřetržitě. Jedná se tedy o elektrárny, kde nelze zajistit rychlý náběh nebo náhlé odstavení, protože mají špatnou regulaci výkonu. Mezi tyto elektrárny patří elektrárny jaderné, vodní průtočné a některé uhelné. Do této oblasti se však musí započítávat i zdroje energie, které mají výrobu nekonstantní, ale jejichž výroba nelze příliš regulovat např. fotovoltaické a větrné elektrárny. [3]

Pološpičkové zatížení

Jedná se o oblast ležící mezi zatížením základním a špičkovým. Pro pokrytí této oblasti se využívají zejména akumulární vodní, paroplynové a plynové elektrárny. [3]

Špičkové zatížení

Jedná se o oblast, která je vymezená maximálním výkonem. V této oblasti pracují zejména elektrárny, které lze rychle a snadno regulovat z důvodu pokrytí okamžité výkonové spotřeby. Jedná se tedy zejména o elektrárny vodní přečerpávací a plynové. Do této oblasti také zařazujeme akumulaci. [3]

1.2 Využití akumulace v elektrizační soustavě

Pro stabilní provoz energetických sítí musí okamžitá výroba elektrické energie přesně odpovídat její spotřebě. Tato rovnováha je však často narušována poruchami elektráren, vedení nebo špatnou předpovědí výroby OZE. Tyto situace mohou vést k náhlému nadměrnému nebo nedostatečnému zásobování elektrickou energií. Využití akumulace pro poskytování podpůrných služeb v síti je jednou ze slibných možností, jak udržet její stabilní provoz. [4]

1.2.1 Grid Balancing - Nedostatek nebo přebytek výkonu

Potýkáme se se situacemi, kdy vyrobené energie je v síti nedostatek nebo naopak přebytek. Tyto výkyvy jsou v síti běžnou záležitostí a dispečerů se s ní vypořádávají regulací na straně zdrojů, ale i spotřeby. Například využitím tarifní struktury nebo čerpáním vody do přečerpávacích elektráren. S nárůstem využití neregulovatelných obnovitelných zdrojů se tento problém začal prohlubovat a je stále složitější se s těmito stavy vypořádat. Akumulace energie v tomto případě může být dobrým pomocníkem. V situacích, kdy je energie v síti přebytek, je možné akumulátor zapojit jako spotřebič a tohoto přebytku se takto zbavit. Později, když je energie v síti nedostatek, je možné tuto chybějící energii z akumulátoru dodávat zpět do sítě. [5]

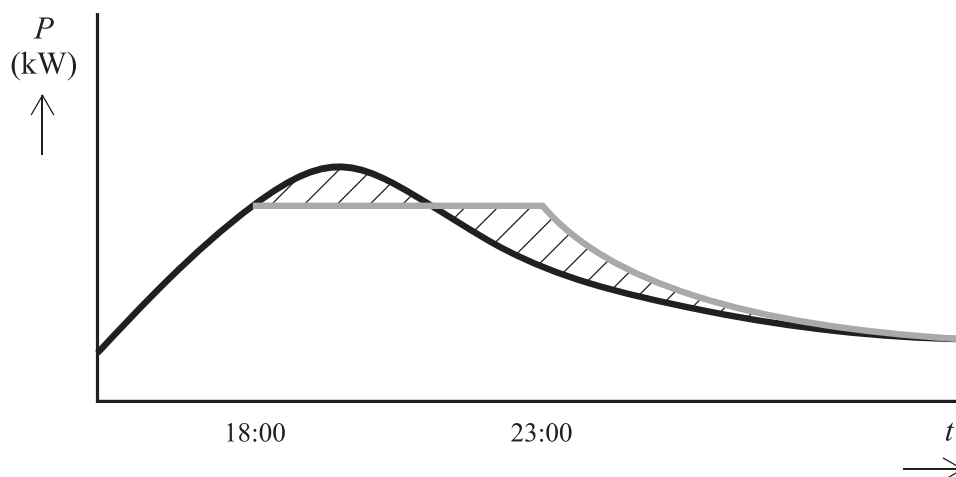
Peak shaving a peak shifting

Tyto koncepty jsou jedny z mnoha způsobů využívání baterií nebo BESS během špiček. Za účelem vyhnutí se přetížení v síti se energie shromážděná mimo špičky využije. Kromě toho je využití těchto konceptů ekonomicky příznivé, jelikož se využívá levnější energie mimo špičky.

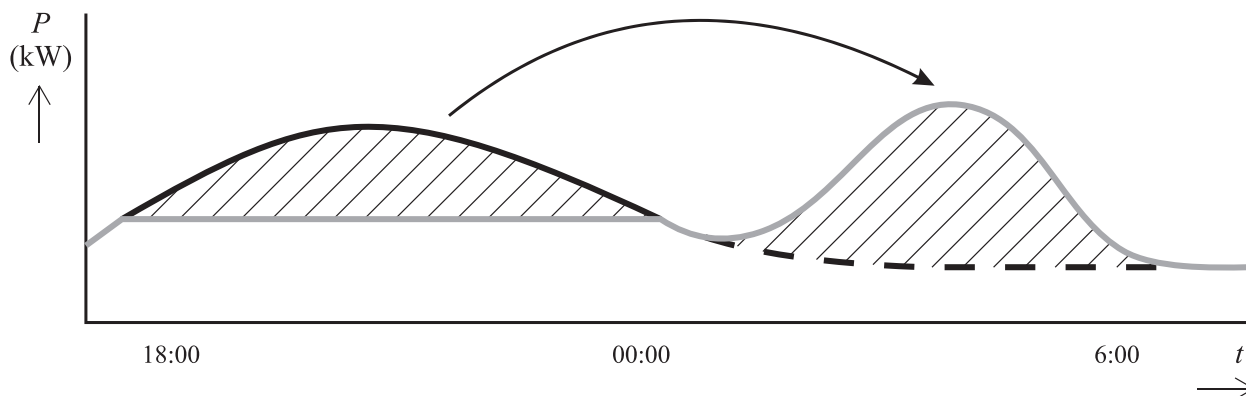
[5]

Peak-Shaving (vyrovnání špičkového odběru) názorně reprezentuje obrázek 1.3. Je zde znázorněno, jak se pomocí tohoto konceptu výkonová špička rozprostře na delší časový úsek, a tak se sníží okamžitá hodnota potřebného příkonu. [5]

Obrázek 1.4 reprezentuje koncept Peak-Shifting (posunutí špičkového odběru). Je zde znázorněno, že v čase drahé špičkové energie se na pokrytí špičky využije energie z akumulátoru. Akumulátor poté dobijí v době mimo špičku, kdy je tato energie levnější. [5]



Obrázek 1.3: Peak-Shaving [5]



Obrázek 1.4: Peak-Shifting [5]

1.2.2 Zlepšení kvality elektrické energie v síti

Podle vyhlášky 306 Energetického regulačního úřadu, který byl vydán roku 2001 platí, že každý odběratel elektrické energie má právo odebírat elektrickou energii o jasně definované kvalitě. Tato kvalita je určena normou ČSN EN 50160. Parametry které norma stanovuje jsou frekvence, průběh napětí, symetrie mezi jednotlivými fázemi a velikost napětí. Proto je snahou všech výrobců a distributorů tyto parametry udržovat na požadované úrovni. Změnou zatížení sítě je způsobeno kolísání velikosti napětí. [6]

Například pro síť NN s 230V proti zemi norma vyžaduje, aby se 95% efektivních hodnot napájecího napětí, měřených v deseti minutových intervalech, pohybovalo v rozmezí 207V až 253V. Což odpovídá až 10% odchylce od jmenovité hodnoty. [6]

Frekvence sítě v České republice je 50Hz. Střední hodnota kmitočtu se podle normy musí nacházet v intervalu mezi 49,5Hz a 50,5Hz. V průběhu roku musí být frekvence v tomto intervalu 99,5% času. Frekvence se nikdy nesmí nacházet mimo interval 47Hz až 52Hz. [6]

Sinusový průběh napětí je generován třífázovými synchronními stroji v elektrárnách. Spotřebiče v síti jsou vždy dimenzovány na tento sinusový průběh napětí. Je tedy důležité, aby se průběh u spotřebiče shodoval co nejpřesněji s průběhem na svorkách synchronního generátoru. [6] Síť je také symetrická, tím rozumíme, že velikost fázového napětí v jednotlivých fázích je stejná a že jsou jednotlivé fáze od sebe posunuty o 120° elektrických. [6]

Připojením akumulace je možné tyto nedostatky v síti alespoň částečně redukovat.

1.2.3 Záloha distribuční transformační stanice

Další stav v distribuční síti, který je vhodný na využití akumulace, je záloha po dobu údržby. Distribuční transformační stanice potřebují údržbu. V době nečinnosti se zpravidla zdroje přepojí na jiné dostupné stanice. Pokud však tato možnost není možná, je vhodné připojit na výstup stanice mobilní akumulaci jednotku a tím zajistit energii spotřebitelům na dobu údržby, zpravidla 8 hodin.

Toto řešení lze použít pro rozvodny NN a transformační stanice VN/NN, na vyšších napětích je tato možnost neuskutečnitelná z důvodu vysokých nároků na akumulaci.

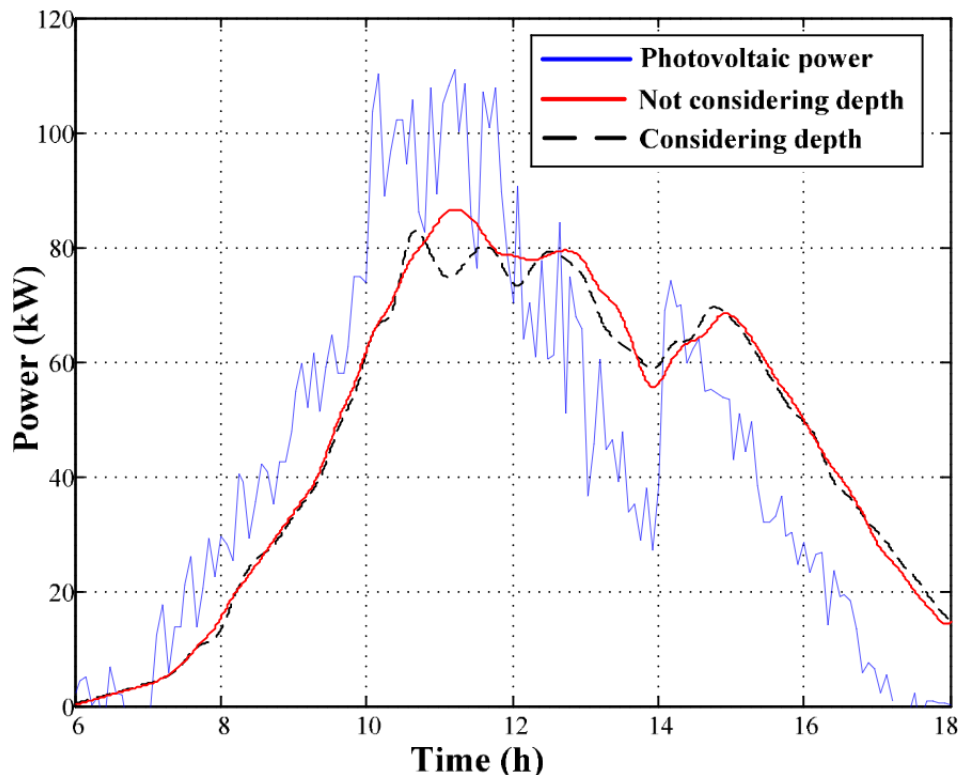
Nevýhody tohoto řešení: Přivezení a instalace akumulace na dobu pouze 8h jsou velmi náročné. Pokud prochází údržbou i NN rozvaděč, je velmi složité napojit akumulaci na všechny vývody.

Dále je možné využít akumulaci jako záložní zdroj napájení pro transformační stanici, když dojde k výpadku na vstupním VN vedení.

1.2.4 Vyhlazení křivky výroby a zátěže (Smoothing)

Příliš kolísavá zátěž a výroba se nepříznivě projevuje v síti, je tudíž žádoucí toto kolísání stabilizovat. Jedná se například o obnovitelné zdroje nebo nabíjecí elektrostanice.

Na tomto grafu můžeme názorně vidět simulační model výstupu fotovoltaické elektrárny o výkonu 150kW s vyhlazenou výkonovou křivkou pomocí malého bateriového úložiště do 80kWh. [7]



Obrázek 1.5: Smoothing [7]

1.3 Dopad elektromobility na DS

S rostoucí poptávkou po elektronabíjecích stanicích se zvyšuje také jejich dopad na síť. Jak bude jejich počet přibývat, nabíjení bude primárně ovlivňovat nízkonapěťové distribuční sítě, protože řidiči budou většinou závislí na domácích nebo poloveřejných prostředích pro nabíjení jejich automobilů. Vzhledem k tomu, že tyto sítě byly ve většině případů navrženy bez předpokladu, že se v budoucnosti budou využívat pro nabíjení EV, budou provozovatelé distribučních sítí muset investovat do jejich posílení. Toto posílení by zahrnovalo zvýšení kapacity vstupních transformátorů, vedení NN a napáječů tak, aby síť byla schopna uspokojit růst špičkové poptávky. Investice do tohoto zesílení se mohou v závislosti na místě lišit. Tradiční posílení sítě je koncepčnější, nicméně může být výrazně dražší než její přestavba na síť inteligentní. Investice do konvenčních sítí však stále mohou být dobrou alternativou, pokud síť toto posílení potřebuje i bez úvahy EV nabíjení (například sítě v nejstarších oblastech měst). [5]

Vyšší špičková zatížení způsobují (obvykle na relativně krátkou dobu) přetížení distribučních sítí, nevýhodně ovlivňující kapacitu a napětí sítě. Přetížení síťového zařízení může zkrátit životnost komponent sítě. Tyto problémy se mohou vyskytnout například v místech, kde jsou čerpací stanice s EV nabíječkami připojeny k transformátorům s nízkým výkonem (až 220 kVA). V takových případech budou provozovatelé distribučních soustav muset modernizovat transformátor nebo dokonce celé vedení VN tak, aby bylo schopno zvládnout dodatečný výkon. Spolu s dalšími elektronickými zařízeními mohou elektromobily přinést také problémy s kvalitou na-

pájení. Pro minimalizaci problémů s kvalitou v síti, je potřeba používat správné standardy a pokročilé technologie. Některé z těchto problémů jako jsou harmonická zkreslení nebo odchylky napětí, mohou některé komponenty v distribuční soustavě více namáhat, a tak snižovat jejich životnost. Nabíjení EV musí odpovídat harmonickým a napěťovým úrovním tak, jak je definováno v následujících normách EN 50160 a IEC 61000-3-2. [5]

1.4 Bateriové systémy skladování energie BESS

I když bylo vyvinuto mnoho technologií pro účely skladování velkého množství energie, například pomocí stlačeného vzduchu, potenciální energie vody, setrvačníků, kondenzátorů a supravodivých úložišť, mnoho z nich je omezeno v závislosti na místě realizace, kapacitě nebo schopnostech odezvy. Elektrochemická zařízení pro ukládání energie nabízejí flexibilitu kapacity, umístění a rychlou odezvu potřebnou k uspokojení požadavků aplikace v mnohem širším rozsahu funkcí než mnoho jiných typů úložišť. Integrace baterií do síťových aplikací má dlouhou historii, přesto systémy pro skladování energie z baterií (BESS) v současné době představují pouze malou část skladování energie v síti. V poslední době však BESS zaznamenaly velký růst díky své univerzálnosti, vysoké hustotě energie a účinnosti. [8]

BESS jsou schopny reagovat téměř okamžitě na požadavky sítě, mají také možnosti fungovat po delší dobu a mají širokou škálu úložných a výkonových kapacit. Z důvodu technologické vyspělosti v oblasti olověných akumulátorů se staly tyto akumulátory pro BESS velmi využívány. Pozdější pokrok v oblasti elektrochemie však umožnil širokou škálu nových možností pro aplikace skladování elektrické energie tak, aby zvýšil robustnost a funkčnost těchto baterií v elektrické síti. V posledních letech byly zahájeny projekty BESS pro mnoho nových elektrochemických technologií, jako jsou: sodík-síra; lithium (Li) iont (včetně Li-titaničitanu a Li-železo-fosfátu); nikl – kadmium; chlorid sodný-nikl; iont sodný; Li-síra; iont hořčíku; kov-vzduch; a několik různých chemií průtokových baterií, které ukládají energii ve svém elektrolytu a pumpují elektrolyt přes článek k nabíjení nebo vybíjení. [8]

1.4.1 Základní parametry

Baterie se dají charakterizovat a porovnávat pomocí následujících parametrů [9]–[11]:

– Jmenovité napětí (V)

Jmenovité napětí je základním parametrem, jedná se o napětí, jednoho článku daného chemického složení. Tyto články se poté do baterií zapojují sériově nebo paralelně podle požadovaného výstupního napětí.

– Kapacita (Ah), (kWh)

Kapacita vyjadřuje celkové množství energie, kterou lze z baterie nebo článku získat za předem definovaných podmínek vybíjení. Podstatné je znát vybíjecí proud a provozní

podmínky. Jednotka ampérhodina (Ah) vyjadřuje počet hodin, po které je baterie schopna dodávat proud o určité hodnotě. Pokud ampér hodiny vynásobíme výstupním napětím, získáme jednotku watthodinu (Wh) tedy výkon za čas.

– **Energetická hustota ($\text{Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$), ($\text{Wh}\cdot\text{l}^{-1}$)**

Energetickou hustotou můžeme popsat množství energie v jednotce hmotnosti nebo objemu. V prvním případě popisujeme množství energie v jednom kilogramu, v druhém množství energie v jednotce objemu resp. litru.

– **Rychlost nabíjení a vybíjení, C-rate (-)**

C-rate neboli také proudová zatížitelnost případně rychlost nabíjení/vybíjení vyjadřuje velikost vybíjecího nebo nabíjecího proudu baterie, je poměrnou veličinou vyjádřenou vůči ampérhodinové jmenovité kapacitě baterie.

– **Stav nabití, State of Charge (SoC) (%)**

Je veličinou určující aktuální podíl energie obsažené v baterii k celkové kapacitě baterie.

– **Hloubka vybití, Depth of Discharge (DoD) (%)**

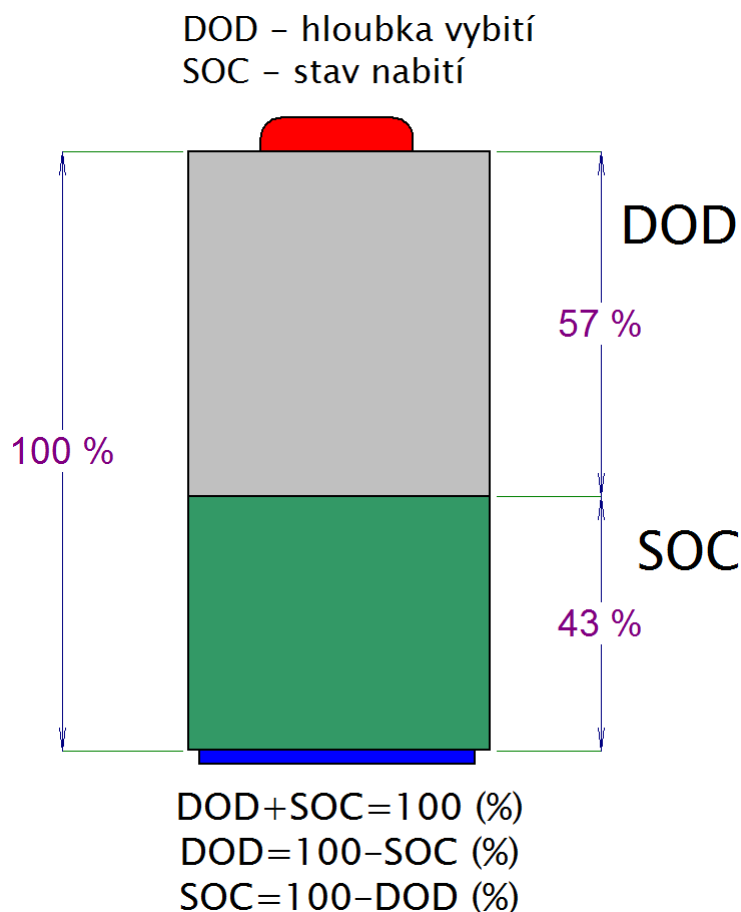
Je inverzní veličinou SoC, vyjadřuje hloubku vybití baterie. Mnoho typů baterií nelze kvůli jejich životnosti v závislosti na cyklu zcela vybit.

– **Stav života, State of Health (SoH) (%)**

Je zjednodušeně definován jako poměr aktuální kapacity článku k jeho katalogové kapacitě. Nový článek by měl mít hodnotu SoH rovnou 1 respektive 100%. Tato definice je však aktuálně nedostatečná, protože v případě, kdy článek zvýší svůj vnitřní odpor, klesá i jeho využitelná kapacita, tento jev se však při běžné zkoušce C20 nemusí projevit. Proto se v současnosti dává přednost jiným zkouškám a výpočet SoH se provádí pokročilými algoritmy.

– **Životnost (cykly), (rok)**

Degradace akumulátorů je úměrná k počtu cyklů a stáří baterie. Životnost baterie se tedy vyjadřuje pomocí počtu nabíjecích cyklů, při kterých se jmenovitá kapacita udrží v předem definovaných mezích nebo počtem let, během kterých nedojde k významné degradaci materiálů na kterých je kapacita baterie závislá.



Obrázek 1.6: Definice SOC a DOD [12]

1.4.2 Typy bateriových systémů

Elektrická baterie se zpravidla skládá z několika elektrochemických článků. Rozlišujeme články primární, které slouží pro jedno použití a články sekundární, které se dají dobíjet opakovaně. [13]

Základem elektrochemického článku jsou dvě elektrody (anoda a katoda) a elektrolyt, který může být v pevném nebo kapalném stavu. Článek může obousměrně převádět energii mezi elektrickou a chemickou. V následující tabulce 1.1 je uveden přehled jednotlivých typů elektrochemických článků. Ke každému typu je doplněna elektrochemická reakce probíhající v článku a jmenovité napětí článku. [13]

Battery type	Chemical reactions at anodes and cathodes	Unit voltage
Lead-acid	$\text{Pb} + \text{SO}_4^{2-} \leftrightarrow \text{PbSO}_4 + 2\text{e}^-$	2.0 V
	$\text{PbO}_2 + \text{SO}_4^{2-} + 4\text{H}^+ + 2\text{e}^- \leftrightarrow \text{PbSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$	
Lithium-ion	$\text{C} + n\text{Li}^+ + n\text{e}^- \leftrightarrow \text{Li}_n\text{C}$	3.7 V
	$\text{LiXXO}_2 \leftrightarrow \text{Li}_{1-n}\text{XXO}_2 + n\text{Li}^+ + n\text{e}^-$	
Sodium-sulfur	$2\text{Na} \leftrightarrow 2\text{Na}^+ + 2\text{e}^-$	~2.08 V
	$\chi\text{S} + 2\text{e}^- \leftrightarrow \chi\text{S}^{2-}$	
Nickel-cadmium	$\text{Cd} + 2\text{OH}^- \leftrightarrow \text{Cd}(\text{OH})_2 + 2\text{e}^-$	1.0–1.3 V
	$2\text{NiOOH} + 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \leftrightarrow 2\text{Ni}(\text{OH})_2 + 2\text{OH}^-$	
Nickel-metal hydride	$\text{H}_2\text{O} + \text{e}^- \leftrightarrow 1/2\text{H}_2 + \text{OH}^-$	1.0–1.3 V
	$\text{Ni}(\text{OH})_2 + \text{OH}^- \leftrightarrow \text{NiOOH} + \text{H}_2\text{O} + \text{e}^-$	
Sodium nickel chloride	$2\text{Na} \leftrightarrow 2\text{Na}^+ + 2\text{e}^-$	~2.58 V
	$\text{NiCl}_2 + 2\text{e}^- \leftrightarrow \text{Ni} + 2\text{Cl}^-$	

Tabulka 1.1: Přehled typů baterií [13]

Olověné baterie

Nejčastěji používanou technologií dobíjecích baterií je technologie založená na olověných článcích. Katoda těchto článků je vyrobena z PbO_2 , anoda je vyrobena z Pb a elektrolytem je kyselina sírová. Olověné baterie mají rychlou dobu odezvy, malé denní samovybití (<0,3%), relativně vysokou účinnost cyklu (přibližně 63-90%) a nízké finanční náklady (50-600\$/kWh). Olověné baterie lze použít ve stacionárních akumulacích zařízeních jako záložní zdroje napájení pro datové telekomunikační systémy a energetice. Byly také vyvinuty jako zdroje energie pro hybridní nebo plně elektrická vozidla. Nicméně aplikace tohoto typu baterií je stále omezená, zejména kvůli relativně nízkému počtu cyklů (přibližně 2000), energetické hustotě (50-90 Wh/l a 25-50 Wh/kg). Kromě toho jejich funkce při nízkých teplotách není příliš dobrá, takže je vyžadován systém řízený teploty, což zvyšuje náklady. V současné době se výzkum a vývoj olověných baterií zaměřuje na: inovace materiálů pro zlepšení výkonu, počtu cyklů a zvýšení schopnosti hlubokého vybití; implementace těchto bateriových technologií do sektorů větrné a solární energetiky a automobilového průmyslu. Vyvíjí se několik pokročilých olověných baterií, které mají rychlé odezvy srovnatelné se setrvačníky a superkondenzátory. [13]

Lithium-ion (Li-ion) batterie

V lithium-iontové baterii je katoda vyrobena z oxidu lithného (např. LiCoO_2 a LiMO_2), anoda

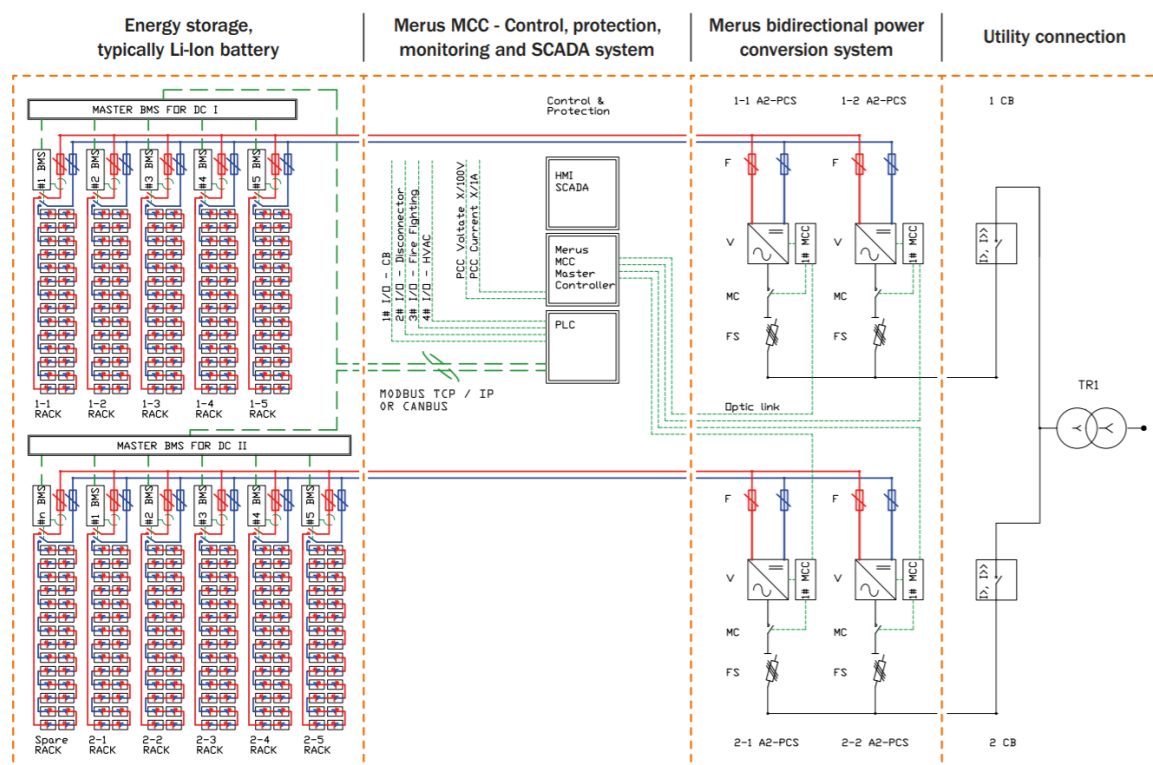
je vyrobena z grafitového uhlíku. Elektrolyt je obvykle bezvodá organická kapalina obsahující rozpuštěné lithné soli, jako je LiClO_4 . Napětí článku u toho typu baterie je 3,7V. Li-ion baterie je považována za dobrého kandidáta pro aplikace, kde je důležitá doba odezvy, malé rozměry nebo hmotnost zařízení. Doba odezvy u lithium-iontových baterií je v řádu milisekund, energetická hustota (1500–10 000 W/l, 75–200 Wh/kg, 150–2000 W/kg). Li-ion baterie mají také vysokou účinnost cyklu, až 97%. Hlavní nevýhody spočívají v tom, že cyklus DoD může ovlivnit životnost lithium-iontové baterie a baterie obvykle vyžaduje ke správě svého provozu počítač, což zvyšuje její celkové náklady. [13]

Současný výzkum Li-ion baterií se zaměřuje zejména na: zvýšení kapacity baterie při použití nano materiálů; zvyšování specifické energie baterie vývojem pokročilých elektrodových materiálů a elektrolytů. Americká společnost AES Energy Storage v New Yorku komerčně provozuje Li-ion BES systém určený pro regulaci frekvence o parametrech (od roku 2010 8MW/2MWh, v roce 2011 rozšířený o 16 MW) tato společnost se rozhodla pro využití Li-ion BESS (32MW/8MWh) také pro podporu 98MW větrné elektrárny Laurel Mountain. V prosinci 2013 společnost Toshiba rovněž oznámila projekt instalace Li-ion baterie 40MW/20MWh v Tohoku, který pomůže integrovat obnovitelné zdroje do sítě. Kromě toho se nyní Li-ion baterie používají v hybridních a plně elektrických vozidlech (HEV a EV), které používají velkoformátové články a akumulátory s kapacitou 15–20kWh pro HEV a až 50kWh pro EV. [13]

Li-ion baterie vycházejí aktuálně ekonomicky nejlépe. Proto jsem v této práci pro pozdější aplikace zvolil tento typ.

1.4.3 Struktura úložiště

Úložiště je zpravidla rozděleno do čtyř hlavních bloků viz. 1.7. Pro popis úložiště jsem zvolil energetické úložiště od finské společnosti MERUS. Podobná úložiště však poskytují i výrobci jako je Siemens nebo ABB.



Obrázek 1.7: Struktura úložiště MERUS ESS [14]

– Akumulační část

Bateriové úložiště je složeno z akumulčních modulů zapojených do série z důvodu dosažení potřebného stejnosměrného napětí. Toto napětí se typicky pohybuje mezi 600 - 1500V DC. Jedna skupina sériově zapojených modulů tvoří stojan. Stojany jsou spolu propojeny paralelně pro dosažení potřebné energetické kapacity. Každý stojan může obsahovat svůj vlastní řídicí systém baterie (BMS - Battery management system), který sleduje stav nabití (SoC), životní stav baterie (SoH), napětí, proud a teplotu všech bateriových modulů ve stojanu. BMS také provádí ochranu a řízení. [14]

– Řízení, ochrana a monitorování a systém SCADA

V této části se nachází počítač, který měří systémová napětí a proudy, z těchto hodnot vypočítává potřebný proud pro PCS (Power Conversion System - Systém přeměny energie) v závislosti na aktivních provozních režimech a stavu nabití baterií. Referenční proud sděluje PCS a aktivuje řízení výstupu bateriového úložiště. Dále systém komunikuje s obsluhou na vyšší úrovni, SCADA - Supervisory Control And Data Acquisition, tedy „dispečerské řízení a sběr dat“. [14]

– Systém obousměrné přeměny energie (PCS)

Tento modul obsahuje obousměrné měniče, které jsou pro funkci takového zařízení nepostradatelné. Jejich cílem je generovat vysoká stejnosměrná napětí a nabízet optimální kvalitu elektrické energie. V tomto případě umí měniče Merus generovat stejnosměrné napětí v rozsahu od 600V do 4000V DC s možností variability ve výkonu od 50kVA do 2000kVA. Díky tomu lze provozovat bateriové úložiště až do stovek MWh. [14]

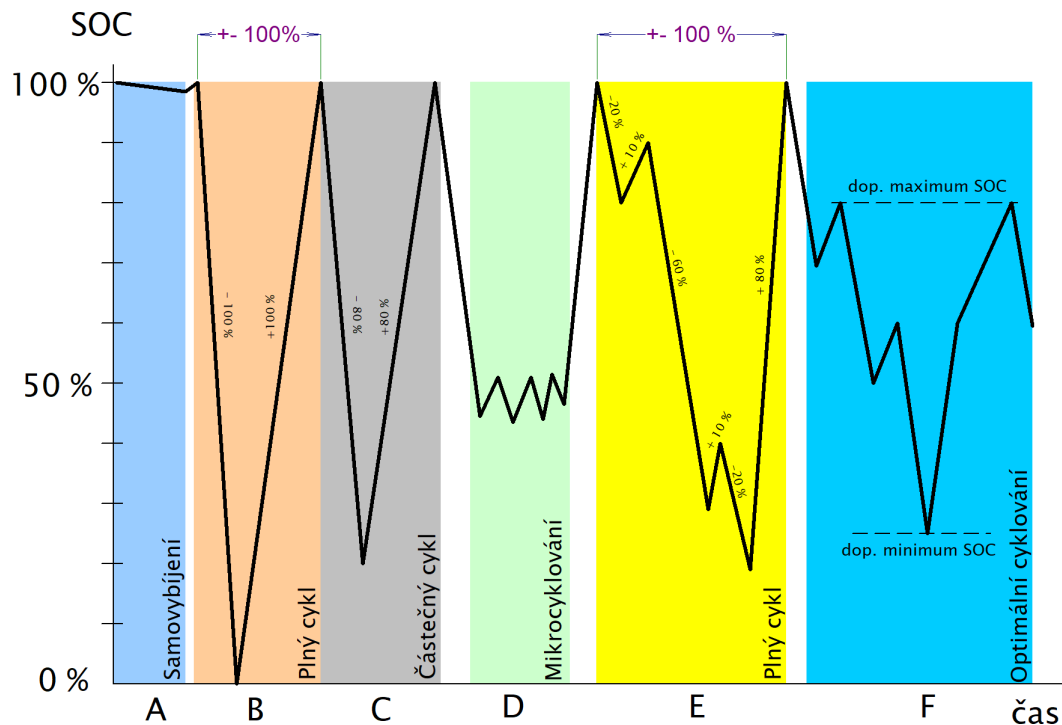
– Připojení do energetické sítě

Z důvodu zvýšených dynamických a tepelných namáhání kvůli rychlým změnám zátěže vyžadují tyto aplikace zpravidla speciální transformátory pro práci se střídači. Suché transformátory s odlévanou izolací z pryskyřice mají navrženy vinutí tak, aby odolávaly namáhání, kterému je vystavován transformátor připojený ke střídači systému BESS. Využití transformátoru zaručuje galvanické oddělení a díky stínění mezi vinutími i výbornou kvalitu a nízké zkreslení průběhu proudu s potlačením vyšších harmonických. [15]

1.4.4 Provoz lithium iontového bateriového úložiště

Cyklus

Lithiové baterie jsou oproti olověným o hodně odolnější na hloubku vybití, zatímco pro olověné články je hraniční hodnota 50% DoD, lithiové technologie jsou schopny dlouhodobě pracovat až do 15% SoC (tj 85% DoD). Překročení těchto hraničních hodnot se výrazně podepisuje na životnosti baterie. Za velmi škodlivé se považují cykly s hloubkou vybití blízko 100% DoD, respektive cykly s napětím na konci cyklu tj. na dolní hranici provozního napětí baterie. V tomto případě rozhoduje o životnosti i doba, kterou v tomto stavu hlubokého vybití baterie stráví. Za nebezpečné stavy jsou považovány zejména ty, kdy se baterie do hlubokého stavu vybití dostane samovybitím. Akumulátorovou baterii můžeme provozovat ve třech stavech (nabíjení, vybíjení a samovybití). [11]



Obrázek 1.8: Popis různých typů cyklů [11]

Základní definice cyklu je založena na změně směru toku energie tedy vybíjení, následné nabíjení a opětovné započítání vybíjení. Tento průběh lze označit za cyklus baterie. Na obrázku

1.8 je přehledně zobrazeno, co se považuje za cyklus. V případě kdy začneme baterii nabíjet až v okamžiku, kdy dosáhne svého minima SoC (tedy maximální hloubku vybití) a poté ji nabijeme na 100%, je počítání cyklů jednoduché viz. oblast B a C. Vždy však nedochází k vybití a nabíjení v tomto režimu. Rozlišujeme dále tyto typy cyklování: mikrocyklování (oblast D) a optimální cyklování (oblast F). U těchto typů už není počet cyklů snadno určitelný, proto se zavádí pojem "plný cykl", který je zobrazený v oblasti B. [11]

Životnost

Baterie je elektrochemický systém, její životnost se odvíjí od následujících základních skutečností [11]:

- závislost na teplotě, při které je baterie provozována, ale i skladována
- závislost na způsobu (rychlosti) vybití a také na způsobu a časovém průběhu nabíjení (rychlost nabíjení)
- závislost na hloubce vybití a době setrvání v daném stavu nabití nebo době trvání přebíjení
- závislost na použitých materiálech a kvalitě zpracování samotného článku, ale i související elektroniky, zejména battery management systému (BMS). Životnost článku může být odlišná od životnosti celého bateriového systému a životnost systémů i článků závisí především na provozních podmínkách, které dnes často definují obvody BMS. BMS tím výrazně ovlivňuje životnost bateriového systému, ale zároveň může být velmi užitečným pro posouzení SoH

Chceme-li analyzovat životnost baterie, je nezbytné uvažovat všechny tyto skutečnosti a další specifika jednotlivých technologií. Z toho vyplývá, že je velmi obtížné životnost detailně analyzovat. [11]

Samovybití

Předpokládané samovybití Lithiového akumulátoru je 5% první den, poté 1-2% měsíčně (s BMS cca 3%). U lithium iontových akumulátorů je také pozorovatelná závislost vybití na stavu nabití. Pokud je článek plně nabitý, je možné pozorovat až dvakrát rychlejší samovybití, než když je článek nabit jen na 40 až 60% SoC. [11]

Nežádoucí stavy článku

Při provozování bateriového článku, musíme dávat pozor na tyto nežádoucí stavy:

– Podbíjení

Li-Ion bateriové články jsou zvláště citlivé na podbíjení. Pokud článek podbíjíme, dochází na něm k nevratným chemickým změnám a to se výrazně podepisuje na jeho pozdější životnosti. [16]

– Přebíjení

Jedná se o stav, kdy se snažíme do baterie nabít více, než na co je dimenzovaná. Tento stav může nastat při nesprávně zvolené dobíjecí metodě nebo při sériovém zapojení článků

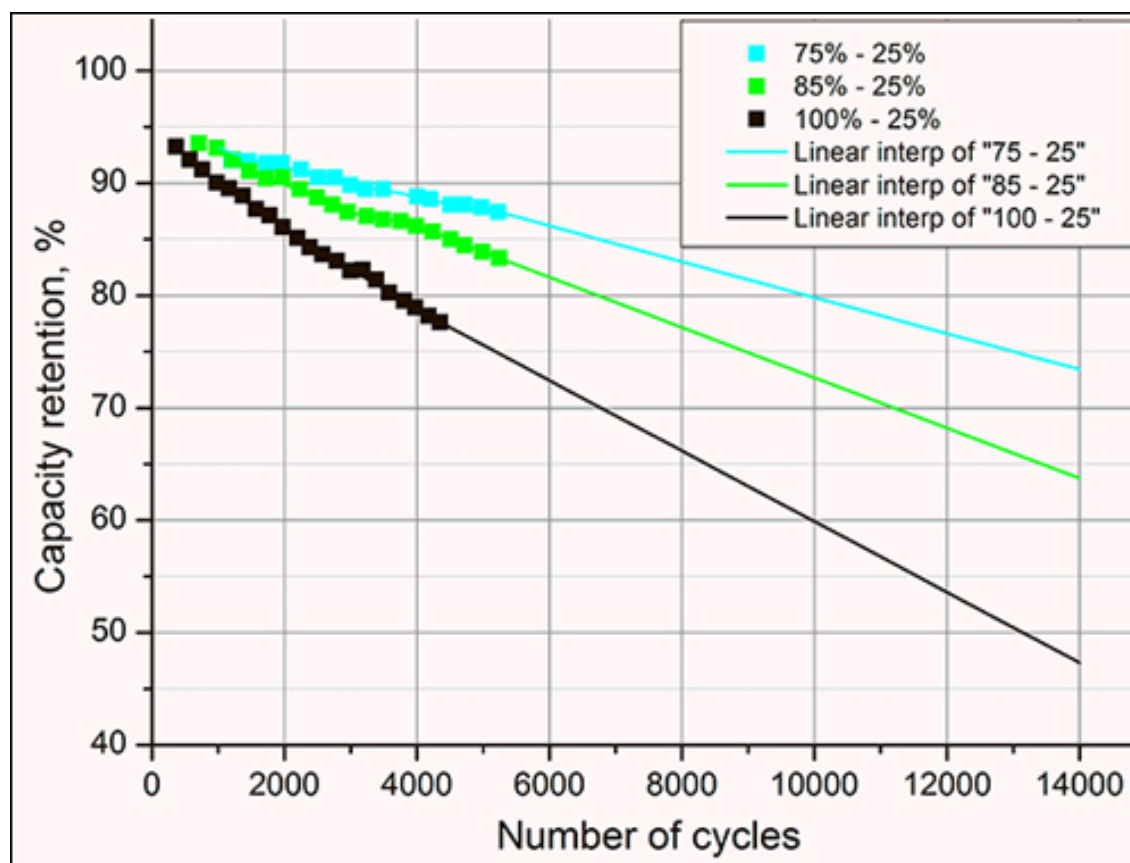
s rozdílnou úrovní nabití. Pokud i minimálně překročíme předepsané mezní hodnoty, dochází k rozpadu elektrod a tím k úplnému zničení článku. [16]

– Nadproudové zatížení

Při nadproudovém zatížení se článek nadměrně otepluje. Oteplení článku může zapříčinit růst tlaku uvnitř článku a jeho mechanické poškození. [16]

Meze SoC

Kvůli jevům přebíjení a podbíjení se u bateriových úložišť využívá omezení stavu nabití na takzvaných ideálních mezních SoC, zpravidla kolem 20% - 90% SoC, čímž se dosahuje delší životnosti bateriového systému. Například pokud máme článek s pracovním napětím 2,5 – 4,2V, je schopen za tohoto provozu článek zvládnout až 500 cyklů. Pokud je ale vybití ukončeno už na 3,0V, jeho životnost se zvýší a je schopen zvládnout dokonce i přes 1500 cyklů. [17]



Obrázek 1.9: Snižování životnosti baterie v závislosti na využití mezí SoC [17]

Tento graf reprezentuje Li-ion baterie, které jsou nabíjeny na tři různé úrovně SoC a je modelována jejich životnost. Omezení rozsahu nabíjení prodlužuje životnost baterie, ale snižuje dodanou energii. To se odráží ve zvýšené hmotnosti a vyšších počátečních nákladech. Dále se tyto data extrapolují za účelem zjištění předpokládané životnosti. Předpokládá se lineární pokles kapacity baterie s postupným cyklováním. Za těchto předpokladů by pak Li-ion baterie cyklovaná v rozmezí 75% - 25% SoC (modrá) po 14 000 cyklech skončila na 74% své kapacity. Pokud by byla tato baterie nabíjena na 85% se stejnou hloubkou vybití (zelená), kapacita by

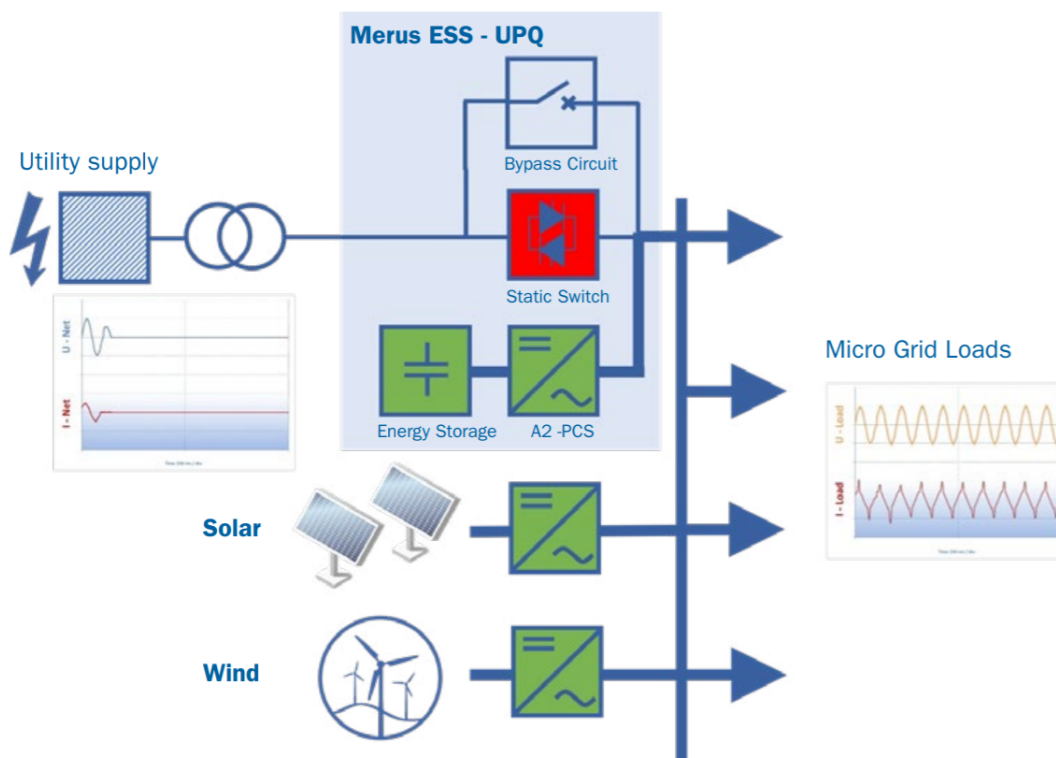
při 14 000 cyklech poklesla na 64%. Při nabíjení na 100% se stejnou hloubkou vybití (černá), by kapacita za stejný počet cyklů klesla na 48%. Z neznámých důvodů je reálná délka života obvykle nižší než v simulovaném modelu. [17]

1.5 Způsoby zapojení BESS v distribuční síti

Bateriové systémy se obecně dají do sítě zapojit dvěma způsoby:

- Sériově
- Paralelně

Zapojení které lze vidět na obrázku se považuje za sériové, jelikož BESS v tomto případě odděluje zátěž od sítě a vytváří tak malou lokální síť. 1.10. Navíc pomocí bypassu, je umožněno, že bateriové úložiště zbytečně neprovádí nabíjení a vybíjení, pokud výkon ze sítě dostačuje, čímž se šetří životnost baterie.



Obrázek 1.10: Zapojení bateriového úložiště do sítě [14]

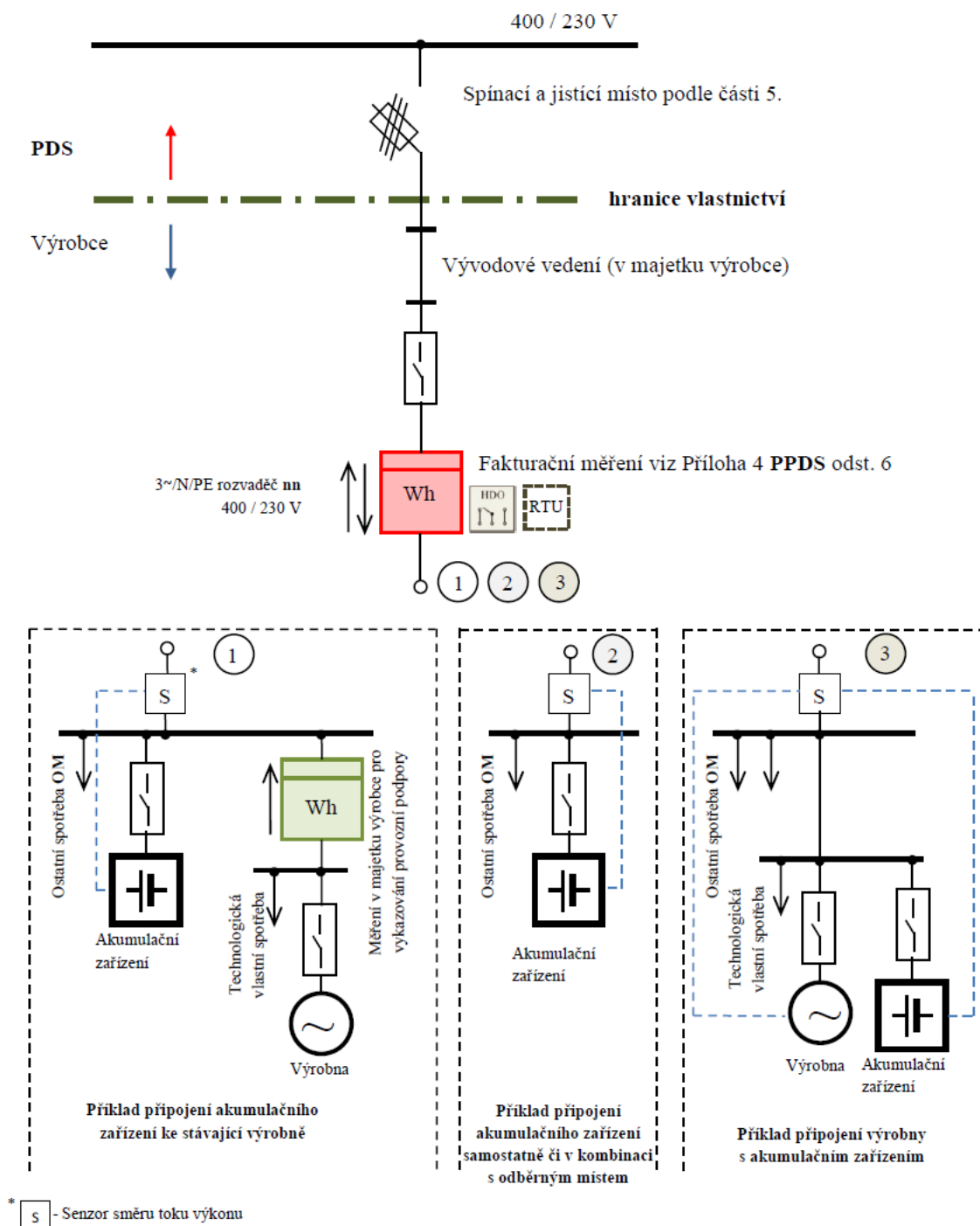
Výhodou tohoto zapojení je, že v případě výpadku zdroje je možné tuto lokální síť odpojit a převést do ostrovního režimu. Dále je zde maximálně sníženo dopravní zpoždění a při skokovém zvýšení zátěže je baterie schopna poměrně rychle zareagovat.

Další možnost zapojení bateriového úložiště je paralelní. Nevýhodou takového zapojení je však dopravní zpoždění reakce akumulace na skokové zvýšení požadovaného výkonu. Může tak v celé síti docházet například k jevu zvaným flickr, který je pro distributora i zákazníka nežádoucí. Další nevýhodou tohoto zapojení je bezpečnost, bateriový systém se musí odpojit okamžitě dojde-li k poruše v distribuční soustavě. Sestupné chránění v síti od trafostanice v tuto situaci nevyhovuje, jelikož není selektivní.

1.6 Technické požadavky distributora na akumulaci

V současné době není umožněno provozovateli distribuční sítě vlastnit akumulční zařízení. Může však být do distribuční sítě připojen akumulátor jiného vlastníka pouze za skutečnosti, že je součástí výroby elektrické energie. Požadavky pro toto připojení definuje dokument Pravidla provozování distribuční soustavy, příloha č. 4. Při zřizování výroby a elektrického akumulčního zařízení je zapotřebí dbát na platná nařízení a předpisy, aby byla vhodná pro paralelní provoz se sítí PDS a aby bylo vyloučeno rušivé zpětné působení na síť nebo zařízení dalších odběratelů. [18]

Výrobnu s akumulací lze připojit přímo k DS, v odběrném místě nebo v předávacím místě jiné výroby. Tato výrobná musí být napojena na dálkové řízení a musí poskytovat výměnu dat, aby bylo možné přerušit dodávku činného výkonu na výstupu. Při přímém napojení baterií na rozvodnu vn s transformací 110 kV/vn bude připojení provedeno tak, aby bylo možné provést manipulace pro vyčlenění velkokapacitní baterie k jejímu použití pouze pro napájení vlastní spotřeby rozvodny přepnutím do režimu ostrovního provozu (pro případ dlouhodobého výpadku DS). Při běžném provozu DS se samostatné udržení v ostrovním provozu nepožaduje. [18]



Obrázek 1.11: Připojení výrobny s akumulací NN do DS [18]

Z Pravidel provozování distribuční soustavy, příloha č. 4. vyplývá [18]:

- 1. Výrobny 100 kVA a více musí být připraveny pro dispečerské řízení.
- 2. Fakturační měření může být provedeno i jako nepřímé. Způsob měření určuje PDS v souladu s Přílohou 5 PPDS a připojovacími podmínkami jednotlivých PDS.
- 3. Červeně označené prvky jsou zařízení v majetku PDS.

- 4. V případě provozu výrobní v ostrovním provozu, předepisuje nastavení rozpadového místa PDS.
- 5. HDO – při řízení výrobní
- 6. Pro delší přípojná vedení budou dopočítávány ztráty na vedení.
- 7. Umístění fakturačního měření společně s přijímačem HDO v elektrické síti může být upraveno odlišně a to v návaznosti na přípojovací podmínky DS.
- 8. Pro výrobní nad 100kVA musí být instalována jednotka RTU. Vlastnictví jednotky RTU určují přípojovací podmínky příslušného PDS.
- 9. Připojování výroben o výkonu 100 kVA a více do sítě NN je možné pouze do rozvaděče NN v DTS.
- 10. Výrobní a akumulární zařízení v příkladu připojení 3 mohou být provozovány každá přes svůj vlastní střídač, příp. mohou využívat jeden společný střídač.

Výrobní s akumulací musí také splňovat podmínky pro chování v síti za normálního provozu. [18]

Provozní frekvenční rozsah

Rozsah frekvence	Minimální doba provozu
47 – 47,5 Hz	20 s
47,5 – 48,5 Hz	30 min
48,5 – 49 Hz	90 min
49 – 51 Hz	neomezeně
51 – 51,5 Hz	30 min

Tabulka 1.2: Povolená frekvence [18]

Trvalé provozní napětí pro výrobní NN

Výrobní elektriny do 100 kW musí být schopna trvalého provozu, pokud napětí v místě připojení zůstává v rozsahu $U_n - 15\%$ až $U_n + 10\%$. Pokud je napětí nižší než U_n , je dovoleno snížení výstupního výkonu odpovídající relativní změně napětí $(U_n - U)/U_n$. [18]

Harmonické

Pokud výrobní splňují požadavky na velikosti emise harmonických proudů (I_V), jak je uvedeno v příloze č. 4 PPDS, lze považovat vliv těchto harmonických na distribuční síť za přípustný. [18]

1.7 Legislativa v České republice

Pro nasazení bateriových systémů v naší elektrizační soustavě je nezbytné jejich legislativní ukotvení. Aktuální stav české legislativy ve vztahu k akumulaci není dobrý, nacházíme se totiž

ve stavu, kdy rozvoj této technologie předstihl rozvoj legislativy. Legislativa se tudíž stává velkou překážkou, která nasazení akumulčních zařízení brání.

Aktuální stav

Energetické odvětví je řízeno zákonem č. 458/2000 Sb. neboli Energetickým zákonem (EZ), Pravidly provozování distribuční soustavy (PPDS) a Kodexem přenosové soustavy ČEPS (Kodex PS). Energetický zákon bohužel v současné době neobsahuje pojem akumulace nebo jiný pojem týkající se ukládání elektrické energie. Je tudíž velkým problémem určit jakým veřejnoprávním regulacím nebo povolením akumulace podléhá. [4]

17. února 2021 proběhlo jednání Hospodářského výboru Poslanecké sněmovny ohledně novely EZ. Tento výbor však pozměňovací návrh k akumulaci iniciovaný Asociací pro akumulaci energie AKU-BAT neakceptoval a návrh byl stažen. O jeho nové podobě se bude jednat v budoucnu. [19]

Energetický zákon

V aktuální úpravě EZ není umožněno provozovat podnikatelskou (licencovanou) činnost akumulčního zařízení jako samostatného energetického zařízení s vlastním připojením k elektrizační soustavě. V EZ chybí samostatná kategorie licence pro akumulaci a ukládání elektrické energie, není uvedeno jako předmět podnikání v energetických odvětvích. Jako účastníci trhu s elektřinou jsou zde uvedeni pouze výrobci elektrické energie, provozovatel PS, provozovatelé DS, operátor trhu, obchodníci s elektrickou energií a zákazníci. Tyto účastníci se účastní trhu na základě licencí vydávaných Energetickým regulačním úřadem. Pro každého účastníka jsou v EZ stanovena práva, povinnosti a omezení. Uvedení akumulace do české legislativy se dotkne zejména licencí na výrobu, přenos, distribuci elektrické energie a na její obchod. [4]

Pravidla provozování distribuční soustavy, příloha č. 4

Evropský regulační úřad v roce 2020 schválil nová pravidla provozování distribuční soustavy, která berou do úvahy použití akumulace na úrovni VN a NN. Konkrétně se této problematice věnuje příloha č. 4 PPDS Pravidla pro paralelní provoz výroben a akumulčních zařízení se sítí provozovatele distribuční soustavy. Tato příloha stanovuje akumulční zařízení jako "Zařízení, schopné absorbovat elektrickou energii, po určitou dobu ji v různých formách uskladnit a poté elektrickou energii uvolnit". Tato příloha stanovuje, že v případě připojování výroby k síti o výkonu do 10kW, určených výhradně pro vlastní spotřebu (bez přetoku do DS), se výkon akumulčního zařízení neuvažuje. Nově také pojednává o pojmech jako lokální distribuční soustava, uzavřená distribuční soustava, výrobní elektřiny s akumulčním zařízením, fotovoltaická výrobní elektřiny s akumulčním zařízením. Po splnění několika podmínek není pro provoz akumulčního zařízení nutná licence na výrobu elektrické energie. [18]

Podmínky [4]:

- Akumulátor neslouží k podnikání, ale jen pro vlastní spotřebu.
- Akumulátor svým instalovaným výkonem nepřesáhne 10kW.

- Ve stejném odběrném místě není připojena jiná výrobná držitele licence.

Kodex PS

Tento dokument je veřejně publikovat pravidla a informace pro účastníky energetického trhu. Stanovuje tak minimální konstrukční, technické a provozní požadavky pro připojení a užívání PS, podmínky pro poskytování podpůrných a přenosových služeb.

Akumulace se týká druhá část kodexu zvaná "Kodex II. - Podpůrné služby", kde se stanovuje možnost akumulacím poskytovat služby výkonové rovnováhy (SVR), pokud jsou propojené s výrobnou elektrické energie. Aby se však tento blok mohl ucházet o účast na dodávce SVR, musí nejprve projít náročným testováním. Výsledkem těchto náročných požadavků je, že není umožněno SVR poskytovat například blokům složených z OZE a akumulace, protože nemohou garantovat některé požadavky. Dále není umožněno poskytování SVR samostatně stojícími akumulacími systémy. [4]

Zimní energetický balíček

V listopadu roku 2016 byl Evropskou komisí předložen balíček legislativních návrhů (Čistá energie pro všechny Evropany - Zimní energetický balíček). Tento balíček přispívá k plnění Pařížské dohody a formování energetické unie. Tyto předpisy vstoupily v platnost v letech 2018-2019 a byli schváleny Evropským parlamentem a Evropskou radou.

Byla zde stanovena čtyři pravidla pro vlastníky akumulacích zařízení [20]:

1. Každý vlastník akumulacního zařízení se má právo připojit do sítě a musí mu to být umožněno v přiměřeně dlouhé době.
2. Je zakázáno dvojí zpoplatnění pro akumulacní zařízení vztahující se k elektřině, která zůstává v jejich prostorách a při poskytování flexibilních služeb systémovým operátorům.
3. Poplatky by neměly být diskriminační.
4. Pokud je to technicky možné vlastník akumulacního zařízení může poskytovat i více typů služeb.

Směrnice o společných pravidlech pro vnitřní trh s elektřinou upravuje také práva a povinnosti provozovatelů distribuční sítě v oblasti elektrické energie [4]:

1. PDS musí každé dva roky sestavit rozvojový plán sítě, ve kterém jsou povinni zohlednit i efektivitu akumulace. Tento plán je konzultován s provozovateli přenosové soustavy a s dalšími účastníky trhu.
2. PDS nesmí vlastnit a provozovat akumulacní zařízení. Výjimkou je případ, kdy na trhu žádné akumulacní zařízení není k dispozici, pak si můžou vlastní dočasně pořídit.

Zimní energetický balíček musí státy EU implementovat do svých národních legislativ do konce roku 2020/2021.

2 Popis provozních stavů

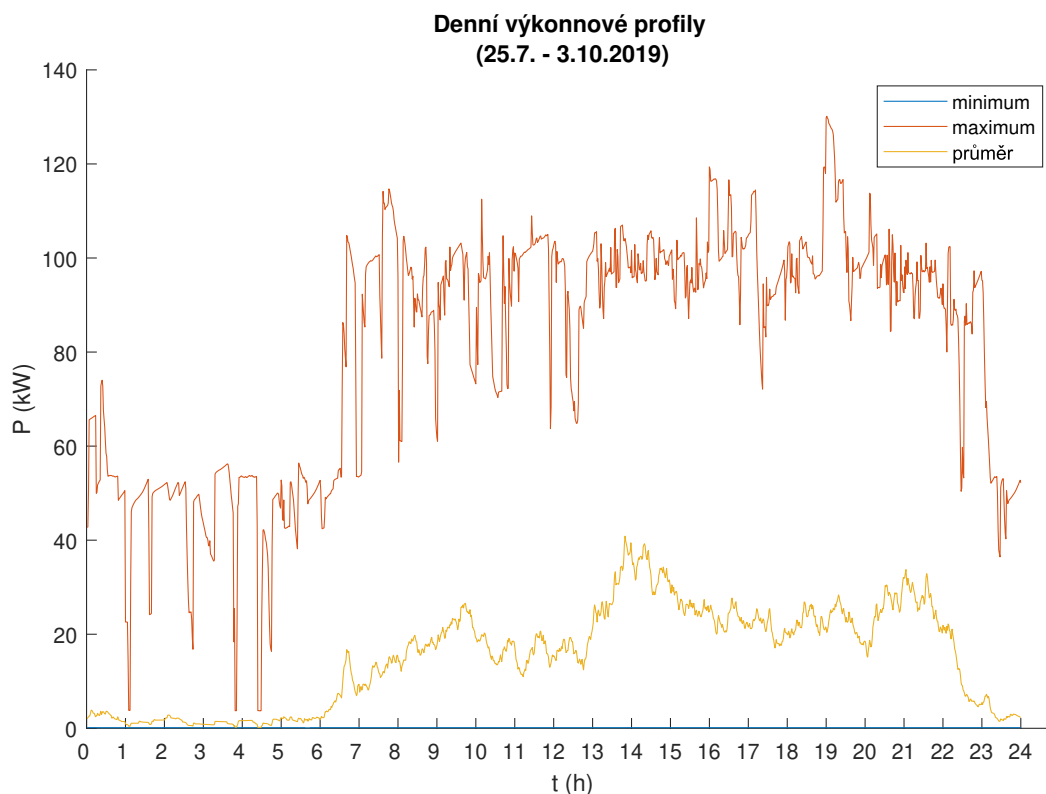
2.1 Analýza dat

Analyzovaná data jsou poskytnuta od společnosti skupina ČEZ. Tyto data se týkají provozu jedné z jejich nejvytíženějších elektronabíjecích stanic roce 2019 na území České republiky na blíže nespecifikovaném místě. Jedná se o minutová měření nabíjecích výkonů všech stojanů pro nabíjení elektromobilů.

Data jsem se rozhodl zpracovávat pomocí softwaru MATLAB. Dle mého názoru je tento software na zpracování takto objemných dat ideální.

Výkony jsem přetransformoval pomocí cyklu for do matice o 71 řádcích (reprezentující dny) a 1440 sloupců (reprezentující minuty v daném dni). Tato matice mi umožňuje s daty lépe pracovat.

Nalezením maximálních, průměrných a minimálních hodnot v každém sloupci jsem vytvořil graf 2.1, tento graf obsahuje křivku kopírující maximální výkon v každou minutu (maximum), průměrnou hodnotu v každé minutě (průměr) a minimální hodnotu v každé minutě (minimum). Minimum v grafu není příliš patrné, protože v každé minutě se vyskytuje alespoň jeden den, kdy v nabíjení v daný okamžik neprobíhalo. Křivka maxima má respektovat největší možné reálné zatížení. Z grafu je patrné, že maximální výkony se velmi liší od aritmetického průměru výkonů, je tudíž zřejmé, že tyto výkony se vyskytují spíše ojediněle.



Obrázek 2.1: Denní profil

Mým úkolem bylo přiřadit výkony těchto nabíjecích stanic do oblastí s omezeným výkonem v síti na 22kW, 33kW a 44kW.

Z grafu je patrné, že výkon 22kW a 33kW v síti není dostačující ani na pokrytí fiktivního průměrného dne. Výkon sítě 44kW je pro průměrný den nedostačující jen v jeden okamžik kolem druhé hodiny odpolední. Na pokrytí maximálních výkonů výkon sítě z daleka nedostačuje požadavkům zákazníka (provozovateli elektronabíjecí stanice). Je tedy nutné uvažovat o nasazení akumulárního zařízení, jelikož průměrný den je ukazatelem velmi přibližným. Z dat vyplývá, že výkon elektronabíjecí stanice je spíše špičkový.

Maximální denní výkony se pohybují v rozmezí od 85,76kW do 130,14kW, z tohoto vyplývá, že žádný ze stanovených síťových výkonostních limitů nebude vyhovující žádný den, protože každý den se vyskytuje minuta, kdy je požadován výkon větší než 85,76kW.

Elektronabíjecí stanice provozované společností ČEZ jsou opatřeny rychlonabíjecími stojany ČEZ s kombinovaným výkonem 50kW DC a 22kW AC, často se však vyskytují i elektronabíjecí stojany Tesla Supercharger s výkonem 150 kW. Výkony sítě 22kW, 33kW a 44kW jsou tedy pro toto využití velmi nízké.

2.2 Vyhodnocení provozních stavů vhodných pro použití akumulace

Denní diagram požadovaného výkonu se dá rozdělit do tří hlavních fází, podle vytíženosti sítě. V grafu 2.2 jsou graficky znázorněny časové poměry určitých fází denního diagramu.

– Klidová fáze (0kW - 1kW)

V této fázi je požadovaný výkon z pravidla téměř nulový. Je to doba, po kterou bude možné výkon v síti využít například pro dobíjení akumulárního systému. Z grafu 2.1 je patrné, že se tato fáze nejčastěji vyskytuje v době mezi 23:30 a 6:00.

V této oblasti se stanice nachází 57% celkového času.

– Střední výkon (1kW - 22/33/44kW)

V tomto rozmezí se na elektronabíjecí stanici vyskytuje zpravidla pouze jedno vozidlo, které se nenabíjí na plný výkon a výkon ze sítě je tak dostačující.

V této oblasti s výkonem sítě 22kW se stanice nachází 17% celkového času.

V této oblasti s výkonem sítě 33kW se stanice nachází 20% celkového času.

V této oblasti s výkonem sítě 44kW se stanice nachází 27% celkového času.

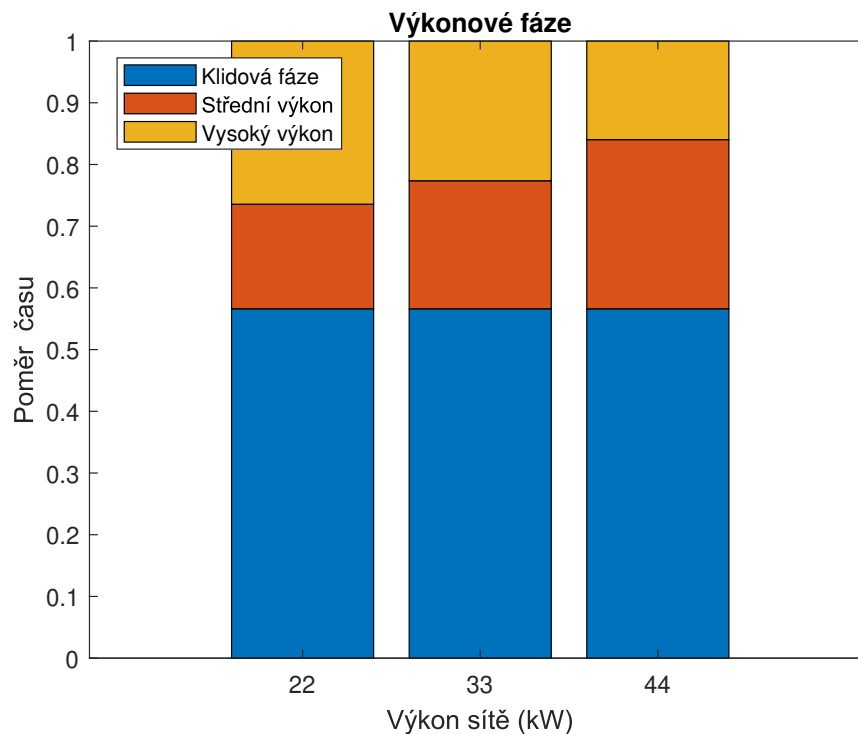
– Vysoký výkon 22/33/44kW a více

Tento výkon není síť schopna pokrýt. Tato situace vyžaduje nasazení baterie nebo omezení požadovaného výkonu.

V této oblasti s výkonem sítě 22kW se stanice nachází 26% celkového času.

V této oblasti s výkonem sítě 33kW se stanice nachází 23% celkového času.

V této oblasti s výkonem sítě 44kW se stanice nachází 16% celkového času.



Obrázek 2.2: Poměrné rozdělení výkonových fází

Informace o tom, kolik času se stanice vyskytuje v dané oblasti je pro nás velmi důležitá, můžeme pomocí ní zjistit, jak moc bude baterie využita a zda je baterie v dané oblasti využita dostatečně.

2.3 Nasazení bateriového úložiště - simulační model provozu

Na základě analyzovaných dat je zřejmé, že výkon sítě je pro takovouto aplikaci zcela nedostačující. Výkon, který síť nemůže dodat, lze pokrýt pomocí bateriového úložiště. Cílem této části je analyzovat zátěž a vybrat správnou velikost úložiště. Budeme tak moci poskytnout přibližné informace o jeho případném použití v praxi.

Simulační model jsem vytvořil opět pomocí softwaru MATLAB. Výkony vyplývající z dat o využití elektronabíjecí stanice jsem v každý okamžik odečetl od zadaného limitního výkonu dodávaného sítí, tím jsem byl schopen určit, jak velký výkon musí baterie v daný čas poskytnout. V případě nízkého zatížení jsem zase zjistil výkon, kterým se baterie může dobíjet. Do simulačního modelu jsem také zakomponoval účinnost akumulátoru a měničů. Tato účinnost vyplývá z materiálů, které jsem obdržel s daty od společnosti ČEZ. Účinnost měničů pro tuto aplikaci je uvažována 97% a účinnost elektrického akumulátoru 90%.

Před touto simulací jsem zadal limitní výkon a odhadovanou velikost baterie.

Baterie jsem volil 100kWh, 200kWh, 300kWh, 400kWh. Výkony sítě 22kW, 33kW a 44kW. Z dat těchto simulací jsem si nechal vypsát vybíjecí profily baterie a také počty dní, ve kterých

se úroveň nabití baterie dostala pod určitou mez. Tato informace je pro nás důležitá, díky ní zjistíme, zda daná velikost baterie dostačuje nebo nikoliv. Všechna tato data jsem zpracoval do následujících tabulek.

Čísla v tabulkách respektují četnost dnů v daném měření, kdy byla simulovaná baterie vybita maximálně na danou procentní úroveň. Celkový počet dnů měření je 71.

maximální vybití	100kWh, 22kW	100kWh, 33kW	100kWh, 44kW
100%	0	0	0
100% - 90%	0	1	14
90% - 80%	2	10	11
80% - 70%	3	5	14
70% - 60%	2	6	8
60% - 50%	3	13	6
50% - 40%	2	7	7
40% - 30%	1	6	3
30% - 20%	6	4	4
20% - 10%	4	2	3
10% - 0%	4	5	0
0% a méně	44	12	1

Tabulka 2.1: Maxima vybití a počet denních výskytů baterie 100kWh

maximální vybití	200kWh, 22kW	200kWh, 33kW	200kWh, 44kW
100%	0	0	0
100% - 90%	2	11	25
90% - 80%	5	11	22
80% - 70%	5	20	13
70% - 60%	7	10	7
60% - 50%	8	7	3
50% - 40%	4	4	1
40% - 30%	9	6	0
30% - 20%	5	0	0
20% - 10%	7	0	0
10% - 0%	3	2	0
0% a méně	16	0	0

Tabulka 2.2: Maxima vybití a počet denních výskytů baterie 200kWh

maximální vybití	300kWh, 22kW	300kWh, 33kW	300kWh, 44kW
100%	0	0	0
100% - 90%	5	16	39
90% - 80%	7	26	21
80% - 70%	11	12	10
70% - 60%	8	9	1
60% - 50%	12	6	0
50% - 40%	9	0	0
40% - 30%	6	2	0
30% - 20%	5	0	0
20% - 10%	3	0	0
10% - 0%	1	0	0
0% a méně	4	0	0

Tabulka 2.3: Maxima vybití a počet denních výskytů baterie 300kWh

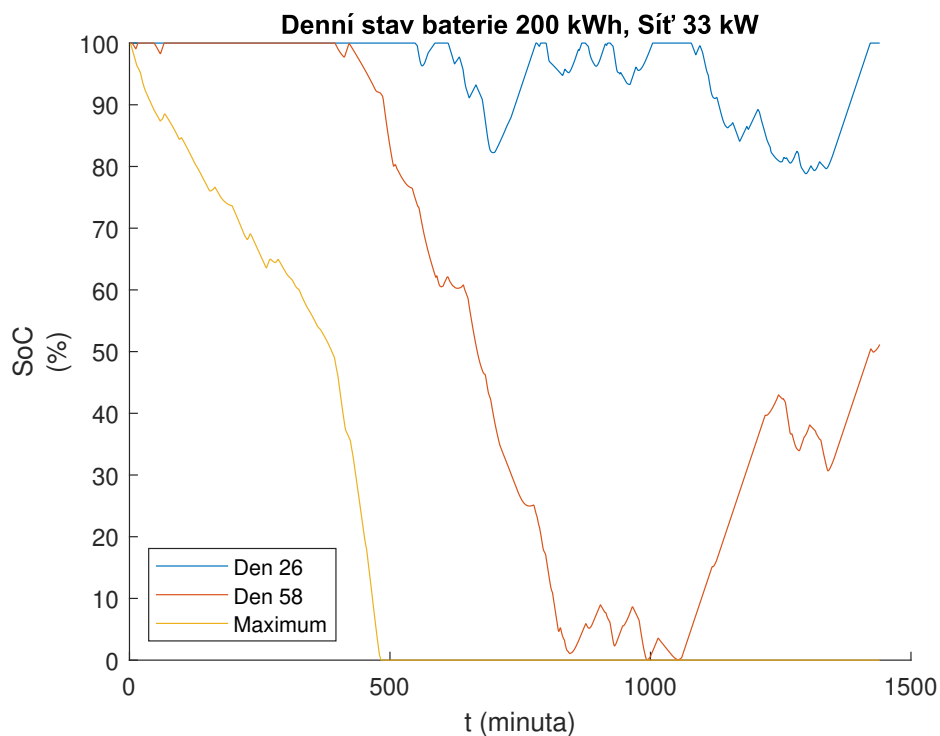
maximální vybití	400kWh, 22kW	400kWh, 33kW	400kWh, 44kW
100%	0	0	0
100% - 90%	7	22	47
90% - 80%	12	30	20
80% - 70%	12	11	4
70% - 60%	14	6	0
60% - 50%	10	2	0
50% - 40%	8	0	0
40% - 30%	4	0	0
30% - 20%	0	0	0
20% - 10%	4	0	0
10% - 0%	0	0	0
0% a méně	0	0	0

Tabulka 2.4: Maxima vybití a počet denních výskytů baterie 400kWh

Denní průběh bez mezí SoC

Jako přibližně průměrný reálný den jsem zvolil 26. den měření (pondělí 19.08.2019). Nejnižšího reálného stavu nabití dosáhlo bateriové úložiště 58. den měření (pátek 20.09.2019). Dále jsem použil maximální možné zatížení použitím maxim z grafu 2.1. Vybral jsem si tyto dny pro znázornění denního průběhu stavu baterie.

Tento graf 2.3 popisuje konkrétní dny při použití baterie 200kWh v oblasti s napájením 33kW. Dále také uvažujeme, že byla baterie v čase 00:00 plně nabitá, tento fakt není příliš velkým problémem, jelikož v simulaci skutečně docházelo, že bateriové úložiště bylo v naprosté většině dnů v ranních dnech plně nabité.



Obrázek 2.3: Simulovaný denní průběh baterie

Z grafu je patrné, že pro reálné zatížení na síti 33kW je velikost bateriového úložiště 200kWh hraničně dostatečná. V několika okamžicích se kapacita téměř dotkne 0% SoC, úložiště je tudíž v tento den využito na maximum. Pro fiktivní maximální denní zatížení je však silně nedostačující. Toto maximální zatížení však respektuje nejhorší možný scénář a je tak velmi nepravděpodobné.

Tyto simulace byly prováděny pro baterie bez limitů SoC, životnost bateriového úložiště provozovaného tímto způsobem by byla značně snížena, jelikož při provozu v nízkých nebo vysokých stavech nabití se baterie rychleji degraduje. Zpracoval jsem proto další situace za použití doporučených mezí SoC.

Rozsah baterie jsem tak omezil od 20% SoC do 90% SoC.

maximální vybití	100kWh, 22kW	100kWh, 33kW	100kWh, 44kW
90% - 80%	0	2	14
80% - 70%	3	10	11
70% - 60%	5	5	14
60% - 50%	3	7	8
50% - 40%	5	13	6
40% - 30%	2	7	7
30% - 20%	2	6	3
20% - 10%	51	21	8
minuty na hranici SoC	5485	1573	222

Tabulka 2.5: Maxima vybití a počet denních výskytů baterie 100kWh s limitem SoC

maximální vybití	200kWh, 22kW	200kWh, 33kW	200kWh, 44kW
90% - 80%	2	11	25
80% - 70%	5	12	22
70% - 60%	5	20	13
60% - 50%	8	10	7
50% - 40%	10	7	3
40% - 30%	12	4	1
30% - 20%	9	5	0
20% - 10%	20	2	0
minuty na hranici SoC	1933	192	0

Tabulka 2.6: Maxima vybití a počet denních výskytů baterie 200kWh s limitem SoC

maximální vybití	300kWh, 22kW	300kWh, 33kW	300kWh, 44kW
90% - 80%	5	16	39
80% - 70%	7	26	21
70% - 60%	11	12	10
60% - 50%	8	9	1
50% - 40%	15	6	0
40% - 30%	11	0	0
30% - 20%	6	2	0
20% - 10%	8	0	0
minuty na hranici SoC	713	0	0

Tabulka 2.7: Maxima vybití a počet denních výskytů baterie 300kWh s limitem SoC

maximální vybití	400kWh, 22kW	400kWh, 33kW	400kWh, 44kW
90% - 80%	7	22	47
80% - 70%	12	30	20
70% - 60%	12	11	4
60% - 50%	14	6	0
50% - 40%	10	2	0
40% - 30%	8	0	0
30% - 20%	6	0	0
20% - 10%	2	0	0
minuty na hranici SoC	223	0	0

Tabulka 2.8: Maxima vybití a počet denních výskytů baterie 400kWh s limitem SoC

Z důvodu nedostatečné kapacity baterie na síti 22kW jsem vytvořil další simulace pro bateriová úložiště 500kWh a 600kWh.

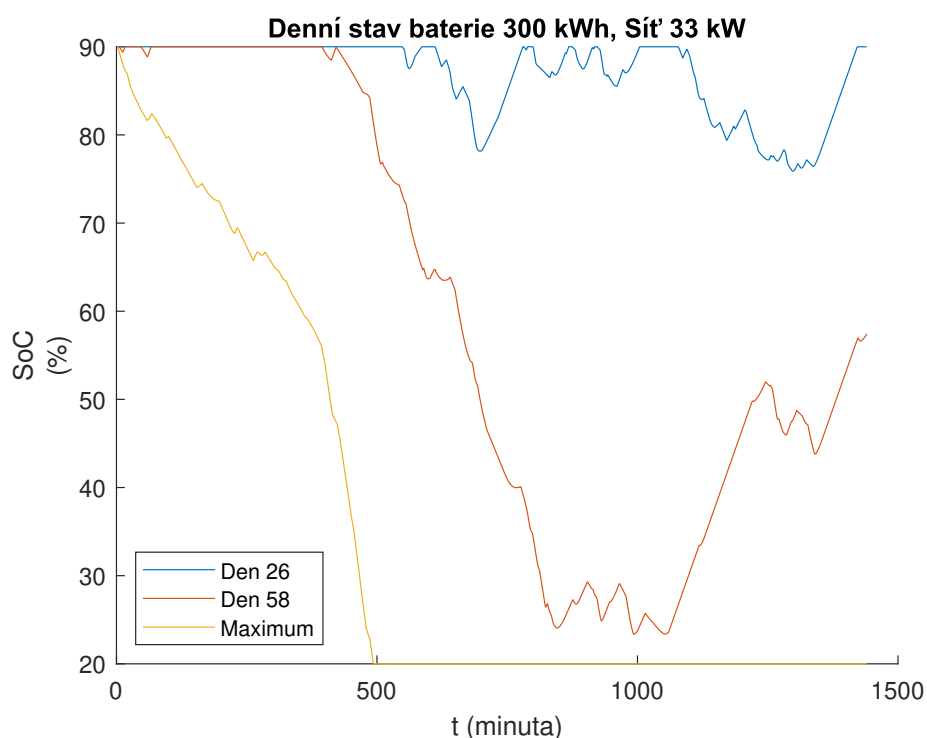
maximální vybití	500kWh, 22kW	600kWh, 22kW
90% - 80%	10	12
80% - 70%	17	19
70% - 60%	16	21
60% - 50%	12	11
50% - 40%	9	4
40% - 30%	3	4
30% - 20%	2	0
20% - 10%	2	0
minuty na hranici SoC	44	0

Tabulka 2.9: Maxima vybití a počet denních výskytů baterie 500kWh a 600kWh s limitem SoC a výkonem sítě 22kW

Denní průběh s aplikací mezí SoC

Znovu jsem volil 26. a 58. den měření (pondělí 19.08.2019 a pátek 20.09.2019) pro znázornění denního průběhu stavu baterie s mezemi SoC. Dále jsem znovu použil maximální možné zatížení použitím maxim z grafu 2.1.

Graf popisuje tyto konkrétní dny při použití baterie 300kWh v oblasti s napájením 33kW a omezením baterie 20% - 90% SoC. V čase 00:00 je bateriové úložiště plně nabitá (90% SoC).



Obrázek 2.4: Simulovaný denní průběh baterie při aplikaci mezí SoC

Z grafu je patrné, že pro reálné zatížení na síti 33kW je velikost bateriového úložiště 300kWh (s aplikací doporučených mezí SoC) dostatečná. Pro fiktivní maximální denní zatížení je však

silně nedostačující. Toto maximální zatížení však respektuje nejhorší možný scénář a je tak velmi nepravděpodobné.

2.4 Zhodnocení

Z dat a simulací jasně vyplývají situace, kdy je nutné využití akumulčního zařízení. Akumulční zařízení je při omezení výkonu sítě (22/33/44kW) pro danou aplikaci nezbytné. Ze simulačního modelu můžeme snadno určit vyhovující kapacity úložiště pro oblasti s určitým výkonovým omezením. Uvažujeme, že toto řešení je prozákaznické, a proto nebereme v potaz možné omezení potřebného příkonu pro stanici.

Tato konkrétní elektronabíjecí stanice by mohla být provozována se vstupním výkonem 22kW za podmínky připojení akumulace minimálně o velikosti 400kWh (viz. Tabulka 2.4), pokud se rozhodneme zvýšit životnost takového bateriového úložiště aplikace doporučených mezí SoC, bude nutné kapacitu baterie rozšířit na 600kWh (viz. Tabulka 2.9). Například při využití pouze 500kWh úložiště, bychom museli za celé měřené období omezit příkon stanice na 44 minut, což neodpovídá požadavkům prozákaznického řešení.

Pro napájecí výkon 33kW bude nutné použít bateriové úložiště minimálně o kapacitě 200kWh (viz. Tabulka 2.2), při využití doporučených mezí SoC bude potřeba využít bateriové úložiště o kapacitě 300kWh (viz. Tabulka 2.7).

Pro napájecí výkon 44kW bude nutné použít bateriové úložiště minimálně o kapacitě 200kWh (viz. Tabulka 2.2), při využití doporučených mezí SoC bude potřebná velikost stejná (viz. Tabulka 2.6).

3 Technickoekonomický návrh

V předchozí kapitole jsme si definovali situace, které jsou vhodné pro použití akumulace. Pomocí simulace jsme schopni odhadnout jak velké by požadované úložiště mělo být pro určité zadané limitní hodnoty výkonu v síti.

Pomocí materiálů, jež jsem obdržel od společnosti ČEZ, jsem vytvořil koeficient. Tento koeficient vyplývá z předpokladů společnosti na stárnutí baterie (+30% rezerva na baterii), z nepřesnosti měření výkonů, která používám při simulaci (+10% rezerva na baterii) a předpokládaného nárůstu elektromobility (+30% rezerva na baterii). Závěry z předchozí kapitoly, konkrétně velikosti bateriových úložišť pro dané výkony sítě, vynásobím koeficientem 1,7, abychom zohlednili vývoj elektromobility, stárnutí bateriového úložiště a empiricky zjištěnou nepřesnost měření.

$$C_{baterie} = C_{simulace} \cdot k \quad (kWh) \quad (3.1)$$

$$k = 1,7 \quad (-) \quad (3.2)$$

$C_{simulace}$ je kapacita bateriového úložiště vyplývající ze simulace. $C_{baterie}$ vypovídá o vhodné baterii pro dané použití při respektování vývoje elektromobility, stárnutí baterie a nepřesnosti v měření.

3.1 Parametry navrhovaného řešení

Na základě požadavků, které jsme zjistili pomocí simulací, se teď pokusím nalézt konkrétní bateriová úložiště. Cena bateriových úložišť se podle informací ze společnosti ČEZ pohybuje mezi 15 - 20 milionů Kč/MWh.

Pro aplikace jsem se rozhodl použít bateriové úložiště od společnosti TESVOLT s parametry:

Technická data	
C-rate	1C
Články	Lithium NMC prismatic (Samsung SDI)
Cyklická životnost* (23°C, 1C/1C, 100% DoD)	6000
Cyklická životnost* (23°C, 0.5C/0.5C 100% DoD)	8000
Kalendářní životnost	30let
Efektivita (baterie)	<98%
Napětí (V DC)	627 - 930
Samostatná kapacita systému (Ah)	94
Teplotní podmínky	-20°C/45°C
Konteiner 20ft/40ft	
Délka (m)	6,06/12,19
Šířka (m)	2,44
Výška (m)	2,9
Maximální počet úložných systémů (-)	12/24
Maximální kapacita (kWh)	864/1728

* 30% ztráta kapacity

Tabulka 3.1: Parametry úložiště TPS od TESVOLT [21]

Toto úložiště je možné sestavit pomocí modulů podle požadavků na optimální velikost a výkon. Moduly jsou o velikosti 67,2kWh a 74kWh.

3.1.1 Výkon sítě 22kW

Zjištěná velikost bateriového úložiště pro aplikaci na síti s výkonem 22kW je 400kWh, s využitím mezí SoC kapacita vychází 600kWh. Pro určení finální velikosti baterie použijeme rovnici 3.1.

$$C_{22kW} = C_{simulace} \cdot k = 400 \cdot 1,7 = 680 \quad (kWh) \quad (3.3)$$

$$C_{22kWSOC} = C_{simulaceSoC} \cdot k = 600 \cdot 1,7 = 1020 \quad (kWh) \quad (3.4)$$

Vhodná velikost baterie pro použití v síti 22kW by byla 680kWh, při využití doporučených mezí SoC 1020kWh.

Bateriové úložiště o kapacitě 680kWh

Jako vyhovující bateriové úložiště jsem zvolil bateriové úložiště TESVOLT TPS 650, jehož parametry jsou:

Produkt	TPS 650
Měnič	SMA SCS 720
Výkon (kVA)	720
Počet bateriových systémů (-)	10
Kapacita bateriového systému (kWh)	67,2
Celková kapacita bateriového úložiště (kWh)	672
Konteiner	20ft

Tabulka 3.2: Parametry úložiště TPS 650 [21]

Toto bateriové úložiště o velikosti 670kWh na síti o výkonu 22kW na základě simulace, při aktuálním stavu a stavu nárůstu elektromobility o 30%, vykoná za dobu měření (71 dnů) 20-31 plných cyklů. Za rok tak těchto cyklů provede 103-155. Udávaná cyklická životnost úložiště je (viz. Tabulka 3.1) 6000 cyklů. Cyklicky závislá životnost by tak mohla být 38 až 58 let provozu. To znamená, že za 38 až 58 let provozu by se kapacita baterie snížila o 30%. Je však nutno brát v potaz mnoho dalších vlivů, takže reálná životnost bude o něco nižší. Dále nás ovlivňuje i životnost kalendářní, která je udávána 30 let.

Cena tohoto bateriového úložiště se pohybuje mezi 10 - 14 miliony Kč.

Bateriové úložiště o kapacitě 1020kWh

Jako vyhovující bateriové úložiště, při použití mezí SoC, jsem zvolil bateriové úložiště TE-SVOLT TPS 650, jehož parametry jsou:

Produkt	TPS 1000
Měnič	SMA SCS 1000
Výkon (kVA)	1000
Počet bateriových systémů (-)	14
Kapacita bateriového systému (kWh)	72
Celková kapacita bateriového úložiště (kWh)	1008
Konteiner	40ft

Tabulka 3.3: Parametry úložiště TPS 1000 [21]

Při použití bateriového úložiště o velikosti 1008kWh s použitím doporučených mezí SoC, při aktuálním stavu a stavu nárůstu elektromobility o 30%, baterie za dobu měření (71 dnů) vykoná 13 - 20 plných cyklů, za to bude rok 66 - 100. Udávaná cyklická životnost úložiště je (viz. Tabulka 3.1) 6000 cyklů. Cyklicky závislá životnost by tak mohla být 60 až 89 let provozu. To znamená, že za 60 až 89 let by se kapacita baterie snížila o 30%. Je však nutno brát v potaz mnoho dalších vlivů, takže reálná životnost bude o něco nižší. Omezuje nás také kalendářní životnost, která je 30 let.

Cena tohoto bateriového úložiště se pohybuje mezi 15 - 20 miliony Kč.

3.1.2 Výkon sítě 33kW

Zjištěná velikost bateriového úložiště pro aplikaci na síti s výkonem 33kW je 200kWh, s využitím mezí SoC kapacita vychází 300kWh. Pro určení finální velikosti baterie použijeme rovnici 3.1.

$$C_{33kW} = C_{simulace} \cdot k = 200 \cdot 1,7 = 340 \quad (kWh) \quad (3.5)$$

$$C_{33kWSoC} = C_{simulaceSoC} \cdot k = 300 \cdot 1,7 = 510 \quad (kWh) \quad (3.6)$$

Vhodná velikost baterie pro použití v síti 33kW by byla 340kWh, při využití doporučených mezí SoC 510kWh.

Bateriové úložiště o kapacitě 340kWh

Úložiště vhodné pro tuto aplikaci jsem našel u německé společnosti TESVOLT.

Jeho parametry jsou:

Produkt	TPS 500
Měnič	SMA SCS 500
Výkon (kVA)	500
Počet bateriových systémů (-)	5
Kapacita bateriového systému (kWh)	67,2
Celková kapacita bateriového úložiště (kWh)	336
Konteiner	20ft

Tabulka 3.4: Parametry úložiště TPS [21]

Toto bateriové úložiště o velikosti 336kWh na síti o výkonu 33kW na základě simulace vykoná za dobu měření (71 dnů), při aktuálním stavu a stavu nárůstu elektromobility o 30%, 26 až 28 plných cyklů. Za rok tak těchto cyklů provede 133,7 - 144. Udávaná cyklická životnost úložiště je (viz. Tabulka 3.1) 6000 cyklů. Cyklicky závislá životnost by tak mohla být 42 až 44 let provozu. To znamená, že za 42 až 44 let tohoto provozu by se kapacita baterie snížila o 30%. Je však nutno brát v potaz mnoho dalších vlivů, takže reálná životnost bude o něco nižší. Dále nás ovlivňuje i životnost kalendářní, která je udávána 30 let.

Cena tohoto bateriového úložiště se pohybuje mezi 5 - 7 miliony Kč

Bateriové úložiště o kapacitě 510kWh

Jako vyhovující bateriové úložiště jsem zvolil bateriové úložiště TESVOLT TPS 500, jehož parametry jsou:

Produkt	TPS 500
Měnič	SMA SCS 500
Výkon (kVA)	500
Počet bateriových systémů (-)	8
Kapacita bateriového systému (kWh)	67,2
Celková kapacita bateriového úložiště (kWh)	537,6
Konteiner	20ft

Tabulka 3.5: Parametry úložiště TPS 500 [21]

Při aplikaci v naší oblasti, na základě simulace udělá baterie o velikosti 537,6kWh s použitím doporučených mezí SoC, při aktuálním stavu a stavu nárůstu elektromobility o 30%, na síti o výkonu 33kW za dobu měření (71 dnů) 16 - 28,5 plných cyklů, což za rok odpovídá 82 - 146,5 cyklům. V operačních parametrech úložiště (viz. Tabulka 3.1) je udávána cyklická životnost 6000 cyklů. Cyklická životnost baterie by tedy mohla být 40 až 73 let (za 40 až 73 let tohoto provozu se kapacita baterie sníží o 30%). Je nutno brát v potaz mnoho ostatních vlivů, takže reálná životnost bude o něco nižší. Stále nás ovlivňuje i životnost kalendářní, která je udávána 30 let.

Cena tohoto bateriového úložiště se pohybuje mezi 7,5 - 10 miliony Kč.

3.1.3 Výkon sítě 44kW

Zjištěná velikost bateriového úložiště pro aplikaci na síti s výkonem 44kW je 200kWh. Ta stejná velikost odpovídá i situaci s aplikací mezí SoC. Pro určení finální velikosti baterie použijeme rovnici 3.1.

$$C_{44kW} = C_{simulace} \cdot k = 200 \cdot 1,7 = 340 \quad (kWh) \quad (3.7)$$

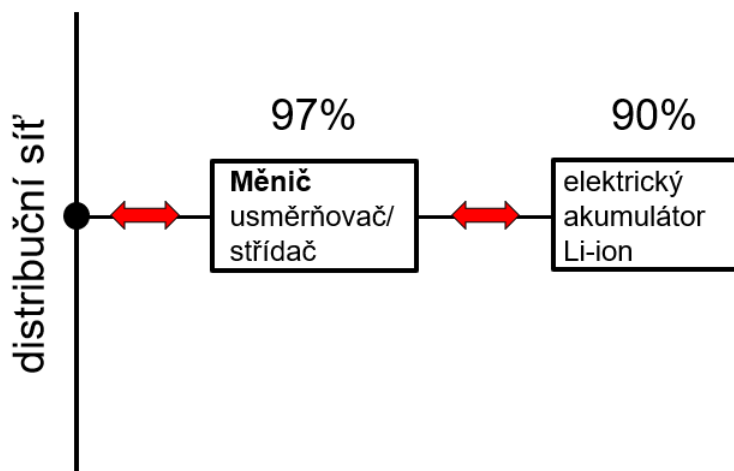
Vhodná velikost baterie pro použití v síti 44kW by byla 340kWh. Což odpovídá bateriovému úložišti z části 3.1.2

Bateriové úložiště o kapacitě 340kWh

Ze simulace jsem vypočetl, že baterie o velikosti 340kWh s použitím doporučených mezí SoC i bez, při aktuálním stavu a stavu nárůstu elektromobility o 30%, na síti o výkonu 44kW za dobu měření (71 dnů) vykoná 15,7 - 32 plných cyklů. Za rok to odpovídá počtu 80 - 164. V operačních parametrech úložiště (viz. Tabulka 3.1) je udávána cyklická životnost 6000 cyklů. Cyklická životnost baterie by tedy při stejném využití mohla být 36 až 74 let (za 36 až 74 let tohoto provozu se kapacita baterie sníží o 30%). Je nutno brát v potaz mnoho ostatních vlivů, takže reálná životnost bude o něco nižší. Kalendářní životnost je udávána 30 let.

Cena tohoto bateriového úložiště se pohybuje mezi 5 - 7 miliony Kč.

3.2 Ztráty



Obrázek 3.1: Účinnost bateriového úložiště [22]

Celkovou ztracenou energii baterie vypočteme pomocí vzorce:

$$E_{ztratova} = E_{in} - E_{out} = E_{in} - (E_{in} \cdot \eta_{menice} \cdot \eta_{baterie} \cdot \eta_{menice}) \quad (kWh) \quad (3.8)$$

Kdy z materiálů obdržených od společnosti ČEZ:

$$\eta_{menice} = 0,97$$

$$\eta_{baterie} = 0,90$$

Pro síť 22kW

Dosadíme do rovnice číslo 3.6 a zjistíme tak ztracenou energii. Data o vstupní energii byla vypočtena v MATLABU z dostupných dat.

$$E_{ztratova} = 13261 - (13261 \cdot 0,97 \cdot 0,90 \cdot 0,97) = 2031 \quad (kWh) \quad (3.9)$$

Ztracená energie použitím akumulace v této oblasti na síti o výkonu 22kW se rovná 2031kWh za dobu měření 71 dnů. Za rok to odpovídá 10,441MWh ztracené energie.

Pro síť 33kW

Dosadíme do rovnice číslo 3.6 a zjistíme tak ztracenou energii. Data o vstupní energii byla vypočtena v MATLABU z dostupných dat.

$$E_{ztratova} = 8701 - (8701 \cdot 0,97 \cdot 0,90 \cdot 0,97) = 1333 \quad (kWh) \quad (3.10)$$

Ztracená energie použitím akumulace v této oblasti na síti o výkonu 33kW se rovná 1333kWh za dobu měření 71 dnů. Za rok to odpovídá 6,852MWh ztracené energie.

Pro síť 44kW

Dosadíme do rovnice číslo 3.6 a zjistíme tak ztracenou energii. Data o vstupní energii byla vypočtena v MATLABU z dostupných dat.

$$E_{ztratova} = 4875 - (4875 \cdot 0,97 \cdot 0,90 \cdot 0,97) = 747 \quad (kWh) \quad (3.11)$$

Ztracená energie použitím akumulace v této oblasti na síti o výkonu 44kW se rovná 747kWh za dobu měření 71 dnů. Za rok to odpovídá 3,84MWh ztracené energie.

3.3 Cena elektrické energie

Tato elektronabíjecí stanice spotřebovala za dobu měření 25,89MWh elektrické energie. Za rok to odpovídá přibližně 133MWh elektrické energie. Při zapojení akumulace se tato spotřebovaná energie zvýší o ztráty (viz. část 3.2), které liší v závislosti na připojené akumulaci.

Cena elektrické energie pro elektromobilitu spadá do tarifu C27d. Podle webové kalkulačky společnosti ČEZ je cena elektrické energie pro tuto elektronabíjecí stanici při výkonu sítě 22kW je 46 651 Kč/měsíčně (cca 4209 Kč/MWh), pro 33kW 47 992 Kč/měsíčně (cca 4330 Kč/MWh) a pro 44kW 48 959 Kč/měsíčně (cca 4417 Kč/MWh). Pokud by nebyla využita akumulace a výkon sítě by musel dosahovat 150kW, cena za elektrickou energii by byla 55 203 Kč/měsíčně (cca 4980 Kč/MWh) [23]

Aktuální ceny nabíjení u dobíjecích stanic ČEZ jsou dohledatelné v tiskové zprávě ze dne 10.5.2020 [24]

Tarif	TAXI	Obchodní cestující	Víkendový řidič	"Pay as you go"	Neregistrovaný
Měsíční platba (Kč/měsíc)	1750	550	200	0	0
Poplatek za odběr (Kč/kWh)	3,5	4,5	5,5	7,5	9,5
Volné jednotky (kWh)	500	122	36	0	0

Tabulka 3.6: Ceny za dobíjení ČEZ [24]

ČEZ elektromobilita také účtuje poplatek za stání na dobíjecím stojanu, z důvodu omezené kapacity míst. Tento poplatek činí 2Kč za každou minutu po ukončení dobíjení nebo u DC dobíjení každá další minuta po 90 minutách dobíjení a u AC dobíjení každá další minuta po 480 minutách dobíjení.

3.4 Ekonomický model

Na základě simulací jsem zvolil velikosti baterií. Pro ty jsem stanovil ve výkonových oblastech 22/33/44 kW ceny za elektrickou energii pomocí webu společnosti ČEZ Prodej, a.s. [23] (viz. část 3.3 Ceny elektrické energie). Analytik společnosti Finlord Boris Tomčiak uvedl, že se

ceny elektrické energie budou zvyšovat o přibližně 2 až 3% ročně. [25] V této práci počítám s nárůstem 2,5% a vypočetl jsem tak cenu elektrické energie za 10 let. Z aktuální a ceny za 10 let jsem vytvořil průměr a využil tento průměr pro analýzu.

Dále jsem podobný postup využil u prodané energie stanice. Zde jsem využil nárůst 30% po 10ti letech. Aktuální prodaná energie stanice je 133MWh, předpokládaná prodaná energie za 10 let je přibližně 173MWh. Pro analýzu jsem opět použil průměr těchto dvou hodnot.

Při provozu bateriového úložiště musíme dále brát do úvahy její provozní (operační a údržbové náklady) náklady fixní a variabilní, které jsou přibližně 355,-Kč/kWh fixní a 45,156,-Kč/MWh variabilní. [26]

Analýzu jsem provedl na návratnost 10 let. Z analýzy vyplývá, za kolik korun českých by se musela jedna kilowatthodina prodat, aby se za 10 let investice vrátila. Investice zde však nezahrnuje cenu nabíjecích stojanů, cena tudíž bude o něco vyšší.

Tento přibližný model lze vidět v tabulce 3.7. Tato tabulka zobrazuje tři situace. Jako nejlevnější variantu 340kWh baterii s 44kW výkonem sítě, kde nutná prodejní cena za kWh, pro návratnost 10 let, vychází 10,59,-Kč. Střední nutnou prodejní cenu 15,91,-Kč za kWh, při návratnosti 10 let, má varianta 680kWh baterie na výkonu sítě 22kW. Jako nejdražší varianta se ukázala kombinace sítě 22kW a bateriového úložiště o kapacitě 1020kWh. V této situaci by musela být prodejní cena 1kWh 20,62,-Kč. Výpočet pro všechny varianty se nachází v příloze 5. Ceny které uvažuji v této práci jsou s DPH.

	340kWh 44kW	680kWh 22kW	1020kWh 22kW
Pořizovací náklady + stavba (Kč)	7 000 000,00	14 000 000,00	20 000 000,00
Přípojka (Kč)	25 000,00	16 000,00	16 000,00
Celkové investiční náklady (Kč)	7 025 000,00	14 016 000,00	20 016 000,00
Náklady provozní fixní (Kč)	120 700,00	241 400,00	362 100,00
Náklady provozní variabilní (Kč)	6 908,87	6 908,87	6 908,87
Průměrná prodaná energie (MWh)	153	153	153
aktuálně prodaná energie	133	133	133
o 30% více za 10 let	173	173	173
Průměrná cena za MWh (Kč)	5 035,50	4 798,50	4 798,50
aktuální cena	4 417,00	4 209,00	4 209,00
za 10 let (2,5% ročně)	5 654,00	5 388,00	5 388,00
Ztráty (MWh)	3,84	10,44	10,44
Náklady nabíjecí za rok (Kč)	789 767,82	784 271,64	784 271,64
Celkové roční náklady (Kč)	917 376,69	1 032 580,51	1 153 280,51
Návratnost (rok)	10	10	10
Nutný roční hrubý zisk (Kč)	702 500,00	1 401 600,00	2 001 600,00
Nutné roční výnosy (Kč)	1 619 876,69	2 434 180,51	3 154 880,51
Nutné prodejní ceny za kWh (Kč)	10,59	15,91	20,62

Tabulka 3.7: Ekonomický model

4 Další možné využití akumulace

Cyklické životnosti těchto bateriových úložišť jsou na základě předchozích výpočtů vyšší než životnosti kalendářní, baterie není využita dostatečně. Tento prostor dává možnost najít další možná využití bateriového úložiště v lokální distribuční soustavě.

Možná využití bateriového úložiště jsou více popsána v části 1.2 (Využití akumulace v distribuční soustavě). Pro lokální distribuční soustavu, ve které se toto bateriové úložiště nachází, lze baterii využít například pro:

- Grid Balancing - nedostatek nebo přebytek výkonu
- vyhlazení křivky výroby a zátěže (Smoothing)
- zlepšení kvality elektrické energie v síti

Krátce po nasazení je navíc baterie mírně předimenzovaná, jelikož uvažujeme nárůst využití v budoucnosti. Ze simulací lze zjistit, že při největším denním zatížením bateriové úložiště dosahuje nejméně 40% - 50% SoC (viz. Tabulka 4.1) To znamená, že i při respektování doporučení minimální meze SoC 20% mají bateriová úložiště až 20% - 30% z celkové kapacity nevyužitých a tato zbylá kapacita se může využít.

V následující tabulce 4.1 vycházející ze simulace, je možné zjistit, kolik dní za dobu měření je bateriové úložiště vybito pod určitou mez SoC. Z tohoto vyplývá, kolik procent je v daném úložišti volných pro další využití. V této tabulce je vypočteno, jak dlouho se může baterie denně jinému využití věnovat, při výkonu rovnajícimu se výkonu sítě. Volná kapacita baterie vycházející z této tabulky bude moci být využita kdykoliv během dne. Tato kapacita je určena ze dnů, které byly pro baterii nejnáročnější. Volná kapacita baterie bude po většinu času výrazně vyšší. Při každodenním použití této volné kapacity se cyklická životnost baterie sníží a bude pohybovat mezi 29 a 34 lety, tato cyklická životnost téměř přesně odpovídá životnosti kalendářní, která je podle výrobce 30 let. Baterie je v tomto případě dostatečně využita.

	340kWh 44kW	340kWh 33kW	510kWh 33kW	680kWh 22kW	1020kWh 22kW
Hodnota maximálního vybití SoC	Počet dní výskytu na dané hladině				
100%	-	0	-	0	-
100% - 90%	-	19	-	12	-
90% - 80%	41	27	35	27	29
80% - 70%	21	13	24	17	27
70% - 60%	8	9	10	10	11
60% - 50%	1	1	2	3	4
50% - 40%	0	2	0	2	0
40% - 30%	0	0	0	0	0
30% - 20%	0	0	0	0	0
20% - 10%	-	-	-	-	-
10% - 0%	-	-	-	-	-
0% a méně	-	-	-	-	-
Kapacita úložiště (kWh)	340	340	510	680	1020
Volná kapacita (kWh)	102	68	153	136	306
Volná kapacita za rok (kWh)	37 230	24 820	55 845	49 640	111 690
Prodaná energie za rok (kWh)	133 000	133 000	133 000	133 000	133 000
Cyklů ročně navíc (-)	110	73	110	73	110
Cyklů celkem (-)	190	207	192	176	176
Cyklická životnost (rok)	32	29	31	34	34
Podíl volné roční kapacity a prodané energie (-)	0,28	0,19	0,42	0,37	0,84
Čas (h)	2,32	2,06	4,64	6,18	13,91

Tabulka 4.1: Využití baterie

Kapacita vyšší než uvedená v tabulce bude moci být využita pouze v dobách téměř plného nabití baterie. Tyto doby byly nalezeny pomocí softwaru MATLAB jako časy, kdy se úroveň SoC pohybuje v 90% případů nad 95% možného nabití SoC (v případě využití doporučených mezí SoC se uvažuje jako 100% nabití 90% SoC, které je v této situaci maximální možné). Tyto časy se liší, například pro baterii 22kW je tato doba nulová, veškerý volný čas je potřeba využít pro dobíjení baterie. Zato pro baterii 510kWh na síti o výkonu 33kW je vhodný čas pro toto využití v časech přibližně mezi 1:00 a 9:00. Pro baterii 340kWh na síti o výkonu 44kW je možné pro další využití baterii provozovat v čase mezi 23:00 a 14:00. Tento návrh je platný maximálně po dobu jednoho roku. Situace se bude velmi měnit a návrh se musí každý rok přehodnotit. Navíc nebude možné baterii pro tyto vedlejší služby používat po celou dobu její životnosti, jelikož se její kapacita bude blížit kapacitě potřebné pro dobíjecí stanici a nebude již volná kapacita k dispozici.

5 Závěr

Existuje několik možných využití pro akumulátorová úložiště v síti. Pomocí takovýchto úložišť můžeme pokrývat nedostatky energie nebo uložit její přebytky. Bateriové úložiště může napomoci i zlepšení kvality elektrické energie nebo vyhladit výkonovou křivku u nestálých zdrojů nebo spotřebičů.

Pro správné pochopení provozu bateriového úložiště je dobré znát jeho parametry a možnosti využití. Bateriová úložiště jsou velmi náchylná na přebíjení a podbíjení. Takové stavy výrazně snižují jejich životnost. Je tudíž žádoucí, držet baterii v doporučených mezích stavu nabití (SoC).

Technické požadavky distributora jsou uvedeny v Pravidlech provozování distribuční soustavy (PPDS), z těchto pravidel primárně vyplývá, že distributor nesmí vlastnit akumulární zařízení, ale může být do sítě připojený akumulátor jiného vlastníka, pokud je součástí výroby elektrické energie.

Legislativa ohledně akumulace v České republice výrazně zaostává. I po velkých očekáváních z roku 2020 se však stále samostatná akumulace na našem území provozovat nedá.

Současný trend vývoje elektromobility stále více tlačí na výstavbu nových elektronabíjecích stanic. Modernizace sítí se však nestačí tomuto vývoji vyrovnat a to nahrává využití akumulárních systémů.

Elektronabíjecí stanici, kterou se tato práce zabývá, nelze provozovat na síti s omezeným výkonem (22/33/44kW). Maximální výkony této stanice dosahují až 130kW. Elektronabíjecí stanice provozované společností ČEZ jsou opatřeny rychlonabíjecími stojany ČEZ s kombinovaným výkonem 50kW DC a 22kW AC. Výkony sítě 22kW, 33kW a 44kW jsou tedy pro toto využití velmi nízké. Z dat vyplývá, že síť s výkonem 22kW nebude pro danou aplikaci dostačující ve 26% celkového času, síť s výkonem 33kW nebude dostačující ve 23% celkového času a síť s výkonem 44kW nebude dostačující v 16% celkového času.

Aplikace bateriového úložiště, kterou se práce zabývá, je vhodné a možná i jediné řešení problému nízkého dostupného výkonu v síti v určitých oblastech, kde je nutná výstavba elektronabíjecí stanice. Na základě simulací můžeme navrhnout správnou velikost bateriového úložiště pro danou oblast tak, aby pokrylo výkonové špičky elektronabíjecí stanice na síti s nižším výkonem. Při zohlednění stárnutí baterie, nárůstu elektromobility a nepřesnosti měření jsou vhodné velikosti úložišť pro síť 22kW 680-1020kWh, pro síť 33kW 340-510kWh a pro síť 44kW 340kWh. Bez použití bateriového úložiště by byl provoz takové stanice v daném místě nemožný.

Ze simulací tohoto úložiště je patrné, že bateriové úložiště v této aplikaci není dostatečně využito. To se projevuje například odhadovanou cyklickou životností, která v některých případech dosahuje i 89 let. Reálná kalendářní životnost baterie udávaná výrobcem je však pouze

30 let. Tento problém lze vyřešit možným zapojením akumulace i do doplňkových služeb jako jsou Grid Balancing nebo zlepšení kvality elektrické energie v síti. Po využití úložiště tímto způsobem se cyklická životnost snižuje na přibližně 30 let, což odpovídá životnosti kalendářní a baterie je tak využita dostatečně.

Využití bateriového úložiště tímto způsobem není však ekonomicky nejpříjemnější. Cena za kWh prodané energie zákazníkům se kvůli připojení akumulace zvýší přibližně o 5 - 15,-Kč na kWh, tyto ceny pak nemohou příliš dobře konkurovat cenám konkurence.

Toto řešení však není koncipováno jako trvalé. Zamýšlené využití tohoto akumulárního systému v této aplikaci je pouze pro nezbytně dlouhou dobu (například 10 let), než dojde k posílení sítě. Poté je možné akumulátor demontovat a přesunout na další podobou oblast, která vyžaduje vyšší výkon a čeká na svou modernizaci.

Seznam použité literatury

- [1] Informační portál, *Subjekty na trhu s elektrinou*. WWW: <https://www.informacni-portal.cz/clanek/subjekty-na-trhu-s-elektřinou> (cit. 23.03.2021).
- [2] M. Galetka, *Přenosová soustava elektrické energie*. WWW: <https://energetika.tzb-info.cz/elektroenergetika/13676-prenosova-soustava-elektricke-energie> (cit. 23.03.2021).
- [3] Informační portál, *Zdroje elektrické energie*. WWW: <https://www.informacni-portal.cz/clanek/zdroje-elektricke-energie> (cit. 26.05.2021).
- [4] V. Nocar, „Využití akumulace elektrické energie a její vliv na trh s elektřinou“, cs, 2020. WWW: <http://dspace5.zcu.cz/handle/11025/40211> (cit. 23.03.2021).
- [5] A. Tigran, „Bateriové systémy skladování energie v distribuční soustavě“, 2019.
- [6] J. Čermák, *Kvalita elektrické energie*, cs. WWW: <https://oenergetice.cz/elektrina/kvalita-elektricke-energie/> (cit. 23.03.2021).
- [7] H. Liu, J. Peng, Q. Zang a K. Yang, „Control Strategy of Energy Storage for Smoothing Photovoltaic Power Fluctuations“, *IFAC-PapersOnLine*, roč. 48, č. 28, s. 162–165, 2015, 17th IFAC Symposium on System Identification SYSID 2015, ISSN: 2405-8963. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.12.118>. WWW: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896315027421>.
- [8] M. T. Lawder, B. Suthar, P. W. C. Northrop, S. De, C. M. Hoff, O. Leitermann, M. L. Crow, S. Santhanagopalan a V. R. Subramanian, „Battery Energy Storage System (BESS) and Battery Management System (BMS) for Grid-Scale Applications“, *Proceedings of the IEEE*, roč. 102, č. 6, s. 1014–1030, 2014. DOI: 10.1109/JPROC.2014.2317451.
- [9] T. B. Reddy, *Linden's Handbook of Batteries, Fourth Edition*, en. McGraw-Hill Education, 2011, ISBN: 9780071624213. WWW: <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780071624213> (cit. 23.03.2021).
- [10] J. Drápela, „Analýza vlivu rychlonabíjecí stanice s akumulací na distribuční soustavu elektrické energie“, en, červ. 2019. WWW: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/82304> (cit. 23.03.2021).
- [11] P. Hrzina, *Cykly a životnost baterie*, cs. WWW: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektřiny/21096-cykly-a-zivotnost-baterie> (cit. 23.03.2021).
- [12] —, *Akumulace elektřiny v budovách: základní parametry a technologie*, cs. WWW: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektřiny/20292-akumulace-elektřiny-v-budovach-zakladni-parametry-a-technologie> (cit. 18.05.2021).
- [13] 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“, *Applied Energy*, roč. 137, s. 511–536, 2015, ISSN: 0306-2619. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.09.081>. WWW: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261914010290>.

- [14] Merus Power Dynamics Oy, *Merus™ Energy Storage System (ESS)*, en. WWW: <https://www.meruspowers.com/products/ess/> (cit. 22.03.2021).
- [15] PMAC, spol. s r. o., „Studie proveditelnosti KIMM Invest s.r.o. Realizace Bateriového úložiště 600 KW/KWh“, tech. zpr., 2020. WWW: <https://www.kimm-invest.cz/wp-content/uploads/2021/01/zjednodu%C5%A1ena-studie--2.pdf> (cit. 18.05.2021).
- [16] L. Kratochvíla, „Systém pro správu Li-ion baterie“, cs, srp. 2017. WWW: <http://dspace.lib.vutbr.cz/xmlui/handle/11012/69308> (cit. 26.05.2021).
- [17] Battery University, *How to Prolong Lithium-based Batteries - Battery University*. WWW: https://batteryuniversity.com/learn/article/how_to_prolong_lithium_based_batteries (cit. 17.04.2021).
- [18] *Pravidla provozování distribuční soustavy | PREDistribuce, a. s.* WWW: <https://www.predistribuce.cz/cs/distribucni-sit/legislativni-predpisy/pravidla-provozovani-distribucni-soustavy/> (cit. 23.03.2021).
- [19] Č. televize, *Zákon o bateriích — Události*, cs. WWW: <https://www.ceskatelevize.cz/ivysilani/1097181328-udalosti/221411000100217/obsah/820662-zakon-o-bateriich> (cit. 21.03.2021).
- [20] J. Fousek, *Perspektivy rozvoje akumulace energie*, 2019. WWW: http://www.akubat-asociace.cz/wp-content/uploads/2019/06/190610-Energetika_%C4%8D1%C3%A1nek-AKU-BAT.pdf.
- [21] Tesvolt GmbH, *Tesvolt TPS 200-864kWh Lithium Battery Storage All-in-One 20ft Container*, en-US. WWW: <https://www.zerohomebills.com/product/tesvolt-tps-200-864kwh-lithium-battery-storage-all-in-one-20ft-container/> (cit. 17.04.2021).
- [22] M. Jelínek, *Akumulace v DS možnosti využití*, 2019.
- [23] Skupina ČEZ, *Elektrina | Skupina ČEZ*, cs. WWW: <https://www.cez.cz/firmy/cs/elektrina.html> (cit. 23.04.2021).
- [24] —, *Nový zákaznický systém a tarify kompletně k dispozici*, cs, říj. 2020. WWW: <http://www.cez.cz/cs/pro-media/tiskove-zpravy/novy-zakaznický-system-a-tarify-kompletne-k-dispozici-83465> (cit. 18.04.2021).
- [25] ČTK, *Analytici: Dlouhodobý výhled cen elektřiny je vždycky nejistý*, cs, 2020. WWW: <https://oenergetice.cz/elektrina/analytici-dlouhodobý-vyhled-cen-elektriny-je-vždycky-nejistý/> (cit. 28.04.2021).
- [26] K. Mongrid, *Energy Storage Technology and Cost Characterization Report*, en. WWW: <https://www.energy.gov/eere/water/downloads/energy-storage-technology-and-cost-characterization-report> (cit. 28.04.2021).

Příloha A - Simulační model bateriového úložiště v softwaru MATLAB

```
clear all
load('BP_data.mat')

k=1;
D=1;
f=1;
cykl = [0,0];
for D = 1:(size(o2.P_celk)/(60*24))
    O2(f,:) = o2.P_celk(k:(D*(60*24)));
    f = f+1;
    k = (D*60*24)+1;
end

D = zeros(13,1);
P_tarif = [0,0];
P_celk = sum(O2)/60;

%baterie a sí#
Cmax=1020;%[kWh]
P_site=22;%[kW]
%SoCmax = Cmax;
%SoCmin = 0;
SoCmax = Cmax - 10*(Cmax/100); %SoC maximum
SoCmin = 20*(Cmax/100); %SoC minimum

C_baterie=Cmax; %baterie na začátku
q=1;
vell = size(O2);
vel = vell(1)* vell(2);

for b=1:1440
    ddz_max(b)=max(O2(:,b));
end
for c=1:1440
    ddz_mean(c)=mean(O2(:,c));
end

%simulace maximálního a průměrného dne
%O2(end+1,:) = ddz_max;
%O2(end+1,:) = ddz_mean;

for den = 1:(vel/(60*24))

    for q = 1:1440
        P_s=P_site;
        P_zbytkovy=(P_s-(O2(den,q)))*1.3 %nár#st elektromobility
        if P_zbytkovy < 0
            O2C(den,q) =
                (C_baterie)+(P_zbytkovy/60)*1.03*1.05;%ú#innost *1.03*1.05
            cykl(1,1) = cykl(1,1)+P_zbytkovy;
        end
    end
end
```

```

else
    O2C(den,q) =
(C_baterie)+(P_zbytkovy/60)*0.97*0.95;%ú#innost *0.97*0.95
    cykl(1,2) = cykl(1,2)+P_zbytkovy;
end
if O2C(den,q) > SoCmax
    O2C(den,q) = SoCmax;
else
    if (q < 480) || (q > 1080)
        P_tarif(1,1) = P_tarif(1,1) + (P_site/60);%NT
    else
        P_tarif(1,2) = P_tarif(1,2) + (P_site/60);%VT
    end
end
if O2C(den,q) < SoCmin %SoC
    O2C(den,q) = SoCmin;
    D(13,1) = D(13,1) + 1;
end
C_baterie = O2C(den,q);
end
%Plot pro všechny dny
% hold on
% plot(O2C(den, :)/(Cmax/100))
% ylabel({'Kapacita baterie','(kWh)'});
% xlabel({'minuta na 24h'});
% title(['Oblast 2 baterie ' num2str(Cmax) ' kWh',', Sí# '
num2str(P_site) ' kW']);
%
O2DM = min(O2C(den,:));
if O2DM/(Cmax/100) == 100
    D(1,1) = D(1,1)+1;
    D(1,end+1) = den;
elseif 90 < O2DM/(Cmax/100) && O2DM/(Cmax/100) < 100
    D(2,1) = D(2,1)+1;
    D(2,end+1) = den;
elseif 80 < O2DM/(Cmax/100) && O2DM/(Cmax/100) <= 90
    D(3,1) = D(3,1)+1;
    D(3,end+1) = den;
elseif 70 < O2DM/(Cmax/100) && O2DM/(Cmax/100) <= 80
    D(4,1) = D(4,1)+1;
    D(4,end+1) = den;
elseif 60 < O2DM/(Cmax/100) && O2DM/(Cmax/100) <= 70
    D(5,1) = D(5,1)+1;
    D(5,end+1) = den;
elseif 50 < O2DM/(Cmax/100) && O2DM/(Cmax/100) <= 60
    D(6,1) = D(6,1)+1;
    D(6,end+1) = den;
elseif 40 < O2DM/(Cmax/100) && O2DM/(Cmax/100) <= 50
    D(7,1) = D(7,1)+1;
    D(7,end+1) = den;
elseif 30 < O2DM/(Cmax/100) && O2DM/(Cmax/100) <= 40
    D(8,1) = D(8,1)+1;
    D(8,end+1) = den;
elseif 20 < O2DM/(Cmax/100) && O2DM/(Cmax/100) <= 30

```

```
        D(9,1) = D(9,1)+1;
        D(9,end+1) = den;
    elseif 10 < O2DM/(Cmax/100) && O2DM/(Cmax/100) <= 20
        D(10,1) = D(10,1)+1;
        D(10,end+1) = den;
    elseif 0 < O2DM/(Cmax/100) && O2DM/(Cmax/100) <= 10
        D(11,1) = D(11,1)+1;
        D(11,end+1) = den;
    else %pod nulou
        D(12,1) = D(12,1)+1;
        D(12,end+1) = den;
    end
    %C_baterie = Cmax; %Baterie nabitá 00:00
end
cykl(1,1) = cykl(1,1)/60;
cykl(1,2) = cykl(1,2)/60;
cykl(2,1) = cykl(1,1)/Cmax;
cykl(2,2) = cykl(1,2)/Cmax;
P_celk = sum(P_celk);

denp = [26 58]; %den který chci vypsát 73 (pr#m#r) a 72(maximum)

hold off
for f = 1:2
    hold on

        plot(O2C(denp(f), :)/(Cmax/100))
        ylabel({'SoC', '%'});
        xlabel({'minuta na 24h'});
        title(['Denní stav baterie ' num2str(Cmax) ' kWh, ' Sí# '
num2str(P_site) ' kW']);

    end
        legend('Den 26', 'Den 58')

for h = 1:24

H(h,:) = histcounts((O2C(:, (60*(h-1))+1:60*h) ./SoCmax),
[0.95,1], 'Normalization', 'probability');

end
```

Příloha B - Ekonomický model

	340kWh 44kW	340kWh 33kW	510kWh 33kW	680kWh 22kW	1020kWh 22kW
Pořizovací náklady + stavba (Kč)	7 000 000,00	10 000 000,00	10 000 000,00	14 000 000,00	20 000 000,00
Přípojka (Kč)	25 000,00	31 500,00	31 500,00	16 000,00	16 000,00
Celkové investiční náklady (Kč)	7 025 000,00	10 031 500,00	10 031 500,00	14 016 000,00	20 016 000,00
Kapacita úložiště (kWh)	340	340	510	680	1 020
Náklady provozní fixní (Kč)	120 700,00	120 700,00	181 050,00	241 400,00	362 100,00
Náklady provozní variabilní (Kč)	6 908,87	6 908,87	6 908,87	6 908,87	6 908,87
Prodaná energie (MWh)	153	153	153	153	153
aktuálně prodaná energie	133	133	133	133	133
o 30% více za 10 let	173	173	173	173	173
Průměrná cena za MWh (Kč)	5 035,50	4 936,50	4 936,50	4 798,50	4 798,50
aktuální cena	4 417,00	4 330,00	4 330,00	4 209,00	4 209,00
za 10 let (2,5% ročně)	5 654,00	5 543,00	5 543,00	5 388,00	5 388,00
Ztráty (MWh)	3,84	6,85	6,85	10,44	10,44
Náklady nabíjecí za rok (Kč)	789 767,82	789 109,40	789 109,40	784 271,64	784 271,64
Celkové roční náklady (Kč)	917 376,69	916 718,27	977 068,27	1 032 580,51	1 153 280,51
Návratnost (rok)	10	10	10	10	10
Nutný roční hrubý zisk (Kč)	702 500,00	1 003 150,00	1 003 150,00	1 401 600,00	2 001 600,00
Nutné roční výnosy (Kč)	1 619 876,69	1 919 868,27	1 980 218,27	2 434 180,51	3 154 880,51
Nutné prodejní ceny za kWh (Kč)	10,59	12,55	12,94	15,91	20,62