



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd

Druhotné využití vyřazených baterií z elektromobilů
Secondary usage of discarded batteries from electric
vehicles

Diplomová práce

Master thesis

Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**

Studijní obor: **Ekonomika a řízení energetiky**

Vedoucí práce: **Ing. Tomáš Králík, Ph.D.**

Jméno studenta: **Bc. Lukáš Janota**

Praha 2020

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Janota** Jméno: **Lukáš** Osobní číslo: **434911**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Studijní obor: **Ekonomika a řízení energetiky**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Druhotné využití vyřazených baterií z elektromobilů

Název diplomové práce anglicky:

Secondary usage of discarded batteries from electric vehicles

Pokyny pro vypracování:

- 1) Analyzujte současný stav a blízký vývoj rozvoje elektromobility v EU a ČR
- 2) Popište a srovnajte technicko - ekonomické parametry baterií používaných pro elektromobilitu
- 3) Identifikujte a analyzujte možné způsoby využití vyřazených baterií
- 4) Proveďte technicko - ekonomické posouzení vybraného způsobu vyřazených baterií

Seznam doporučené literatury:

- 1) Národní akční plán čisté mobility (NAP CM); MPO
- 2) Lifetime Analyses of Lithium-Ion EV Batteries; Peter Keil, Simon F. Schuster, Raghavendra Arunachala, Andreas Jossen
- 3) Final Long-Term Duty Cycle Report, Center for Sustainable Energy

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Tomáš Králík, Ph.D., katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **06.02.2019**

Termín odevzdání diplomové práce: _____

Platnost zadání diplomové práce: **20.09.2020**

Ing. Tomáš Králík, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

_____ Datum převzetí zadání

_____ Podpis studenta

Prohlášení

„Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.“

V Praze dne

.....

Janota Lukáš

Poděkování

Rád bych zde poděkoval vedoucímu mé diplomové práce Ing. Tomáši Králíkovi, Ph.D. za jeho čas a cenné praktické rady, které mi věnoval při řešení a zpracování dané problematiky. Zejména bych mu chtěl poděkovat za iniciativu ke zpracování tohoto aktuálního tématu, během jehož vypracování jsem nabyl mnoho cenných znalostí a rád bych se mu věnoval nadále ve svém profesním životě. Velký dík patří i mému zahraničnímu školiteli diplomové práce Prof. Dr. Ir. Joanu Peutemanu z Faculty of Engineering Technology KU LEUVEN v Belgii. Dále bych chtěl poděkovat panu Mgr. Janu Fouskovi z asociace AKU-BAT CZ za jeho čas a poskytnuté konzultace v oblasti aktuální legislativy v sektoru akumulace. V neposlední řadě chci poděkovat také panu Ing. Jakubu Čejkovi ze společnosti IBG Česko za konzultace v oblasti akumulace. Velký dík patří také mým rodičům, které mi studium umožnili a po celou dobu mě v něm plně podporovali.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá problematikou vyřazených bateriových článků z dynamicky rozvíjícího se sektoru elektromobility. Cílem práce bylo zjištění a zhodnocení vhodných oblastí aplikací těchto baterií v návaznosti na principy cirkulární ekonomiky, udržitelného rozvoje a technických parametrů. Za účelem naplnění cíle práce byla provedena rozsáhlá teoretická analýza oblasti elektromobility a v ní aktuálně využívaných bateriových technologií s důrazem na jejich technické a ekonomické parametry. Pro naplnění myšlenky sekundárního využití baterií byl detailněji analyzován a popsán proces degradace bateriových článků. V poslední pasáži teoretické části byly identifikovány možné stacionární aplikace vyřazených baterií, aktuální legislativní rámec a ekonomické aspekty ovlivňující současný sektor akumulace.

V praktické části práce byl navržen v programovacím prostředí MATLAB matematický model velkokapacitního bateriového úložiště, které poskytuje službu automatické regulace frekvence v síti. Model je rámcově založen na aktuálních podmínkách a požadavcích na poskytovatele této služby výkonové rovnováhy v Německu. Ověření funkčnosti modelu, identifikace možných rizik a optimalizace provozní strategie úložiště byly provedeny aplikací historických dat frekvence v ES ČR. Pro potřebu posouzení ekonomické efektivity dané investice byly vytvořeny tři základní scénáře, jejichž průběh byl navržen s respektováním možných budoucích scénářů vývoje na poli evropského propojeného trhu se SVR a regulační energií. V závěru práce byl ekonomický model podroben citlivostním analýzám zkoumající vliv změn kritických parametrů, tak i změn provozních stavů úložiště během let provozu.

Klíčová slova

Elektromobilita, Technologie bateriových článků, Životní cyklus baterie, Druhotné využití baterií, Bateriový systém ukládání energie, Služby výkonové rovnováhy, Regulace frekvence

Abstract

This master thesis deals with a problematic of discarded battery cells from the field of electromobility which is developing quite fast. The main goal of this thesis was to find out possible applications of these batteries and their critical evaluation due to basic principles of circular economy context, sustainable development, and, last but not least, their remaining technical parameters. To fulfill the purpose of this thesis, there was done wide theoretical analysis of current and near development of the field of electromobility in EU and battery types which are used nowadays in electric vehicles. Battery analysis was performed with emphasis on the battery cell degradation process to respect the idea of the second life of batteries. In the last part of the theoretical section, there were identified possible stationary applications of these batteries under a current legal frame. Furthermore, economical aspects of accumulation of energy were included.

The practical part of the thesis contains a mathematical model of the battery energy storage system which will be providing the automation process of frequency regulation in the power grid. This model was programmed in the development environment of software MATLAB. The model is based on the main conditions and requirements for providers of frequency regulation service in Germany. Correct function and control strategy optimization of the battery model was tested by applying historical data of frequency deviation in the Czech Republic power grid. For the purpose of the economic evaluation of storage, several future development scenarios were designed regarding currently arising and forming interconnected regulation energy market across the EU. At the end of the thesis, economical model was subjected to sensitivity analysis of critical parameters changes and also of possible changes in operating conditions.

Key words

Electromobility, Battery Cell Technology, Battery Life Cycle, Secondary Battery Usage, Battery Energy Storage System, Network Support Services, EU market for ancillary services, Frequency Control

Obsah

1. Úvod	1
2. Elektromobilita	3
2.1. Legislativní rámec elektromobility	4
2.1.1. Současný stav emisí vozových parků v EU	5
2.2. Dopad elektromobility na životní prostředí	6
2.2.1. Stanovení ekologie provozu elektromobilů v zemích EU	8
2.3. Současný stav elektromobility v ČR a EU	10
2.3.1. Důvody současného stavu rozvoje elektromobility v ČR	12
2.3.2. Stav podpory elektromobility v zemích EU	13
2.3.2.1. Dotační politika a infrastruktura elektromobility v Německu	13
2.3.2.2. Dotační politika a infrastruktura elektromobility v Belgii	14
2.4. Budoucnost elektromobility	15
2.4.1. Predikce budoucího vývoje elektromobility v EU	17
2.4.2. Budoucnost elektromobility v ČR	18
2.4.2.1. Budoucí opatření pro podporu vývoje elektromobility v ČR	18
2.4.2.2. Predikce vývoje elektromobility v ČR a její možné scénáře	19
2.4.2.3. Budoucí celková kapacita EV baterií v ČR	20
3. Technologie EV baterií	22
3.1. Technické parametry baterií	23
3.2. Ekonomické hodnocení baterií	26
3.3. Komplexní porovnání bateriových technologií	28
4. Second life of batteries	29
4.1. Výsledný životní cyklus baterie	30
4.2. Proces degradace baterie	32
4.2.1. Degradace baterie vlivem času	34
4.2.2. Degradace baterie v provozu	36
5. Oblasti využití sekundárních baterií	39

5.1. Motivace využívání bateriových systémů	39
5.2. BESS jako možný poskytovatel podpůrných služeb sítě	41
5.2.1. Podpůrné služby sítě a jejich význam	41
5.3. BESS umístěné v uzlu DS	46
5.4. BESS ve spojení s OZE.....	49
5.5. Omezování vlivů nabíjení EV	50
5.6. Pilotní projekty 2nd life bateriových úložišť.....	52
5.6.1. Bateriová úložiště v České republice	55
6. Současné překážky v rozvoji akumulace v ČR	56
6.1. Legislativní rámec akumulace v ČR	56
6.1.1. Akumulace v Kodexu přenosové soustavy ČEPS	58
6.2. Ekonomické aspekty akumulace	60
6.2.1. Stanovení ceny vyřazených baterií.....	61
6.2.2. Trh s PpS	63
6.2.3. Analýza příjmů z ostatních aplikací BESS.....	68
6.3. Zhodnocení vhodnosti BESS pro jednotlivé aplikace	70
7. Bateriový systém pro poskytování služby FCP.....	72
7.1. Matematický model provozu BESS	72
7.1.1. Analýza historických dat frekvence sítě.....	72
7.1.2. Strategie a podmínky provozu BESS pro FCP	76
7.1.3. Roční matematický model provozu BESS	81
7.1.4. Stanovení technické životnosti BESS	86
7.2. Návrh bateriového systému	87
7.3. Ekonomický model provozu BESS.....	91
7.3.1. Optimistický scénář.....	93
7.3.2. Střední scénář	94
7.3.3. Pesimistický scénář	95
7.3.4. Zhodnocení výsledků ekonomických scénářů.....	96

8. Citlivostní analýza	97
8.1. Citlivostní analýza provozních stavů BESS	100
8.2. Citlivostní analýza ceny výkonové rezervy	101
9. Závěrečná doporučení a diskuze.....	102
10. Závěr.....	104
Bibliografie.....	108
Seznam obrázků.....	113
Seznam grafů.....	114
Seznam tabulek.....	116
Seznam rovnic a vzorců.....	118
Seznam příloh.....	119

Seznam použitých zkratek a terminologie

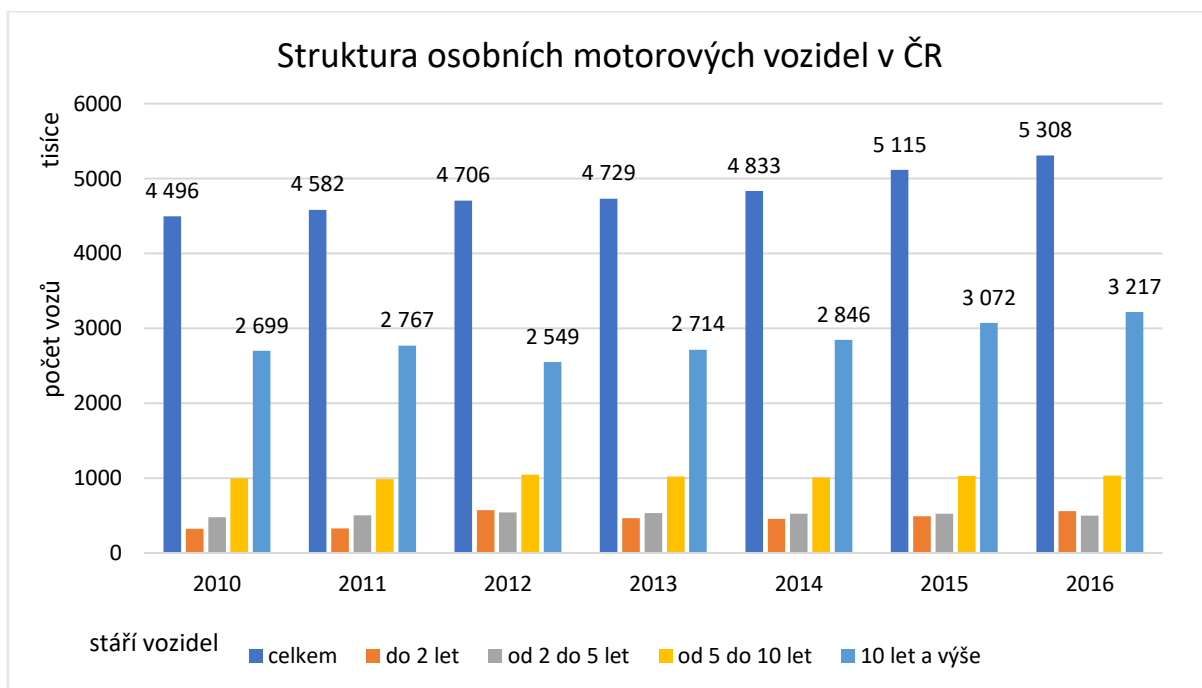
Zkratka	Český význam zkratky	Anglický význam zkratky
ASEK	Aktualizovaná státní koncepce	-
B(a)P	Benzo(a)pyren	Benzo(a)pyrene
BESS	Bateriový systém skladování energie	Battery energy system storage
BEV	Elektrické vozidlo s bateriovým pohonem	Battery electric vehicle
BMS	Řídicí systém baterie	Battery management system
BS	Start ze tmy	Blackstart
BSAE	Bateriový systém akumulace energie	-
CNG	Stlačený zemní plyn	Compressed natural gas
CO	Oxid uhelnatý	Carbon monoxide
CO ₂	Oxid uhličitý	Carbon dioxide
CO ₂ eq.	Ekvivalent oxidu uhličitého	Carbon dioxide equivalent
DB	Pásmo necitlivosti	Dead-band
DC	Stejnoseměrný proud	Direct current
DoD	Hloubka vybití článku	Depth of discharge
DS	Distribuční soustava	-
EF	Emisní faktor	Emission factor
EFC	Ekvivalentní plný cyklus vybití	Equivalent Full Cycles
EFR	Vylepšená regulace frekvence	Enhanced frequency response
EMS	Systém řízení toků energie	Energy management system
EregZ	Regulační energie ze zahraničí	-
ES	Elektrizační soustava	-
EU	Evropská unie	European union
FB	Fiktivní blok	Fictional block
FCEV	Vozidla s palivovými články	Full cell electric vehicle
FCP	Proces automatické regulace frekvence	Fast control process
FCR	Záloha automatické regulace frekvence	Fast control reserve
FVE	Fotovoltaická elektrárna	-
HC	Uhlovodíky	Hydrocarbon
HMC	Hyundai motorová společnost	Hyundai motor company
ICEV	Automobil se spalovacím motorem	Internal combustion engine vehicle
IPCC	Mezivládní organizace změn klimatu	Intergovernmental Panel on Climate Change
IRENA	Mezinárodní agentura pro OZE	International renewable energy agency
JE	Jaderná elektrárna	-
LFP	Fosforečnany Lithno-Železité	Lithium Iron Phosphate
LMO	Oxidy Manganato-Lithné	Lithium Manganese Oxide
mFRP _t	Ručně ovládaný proces obnovy frekvence a výkonové rovnováhy	-

Zkratka	Český význam zkratky	Anglický význam zkratky
mFRR _t	Zálohy pro regulaci výkonové rovnováhy s manuální aktivací	-
MPO	Ministerstvo průmyslu a obchodu	-
NAPCM	Národní akční plán pro čistou mobilitu	-
NCA	Lithium Nikl Kobalt Hliníku	Lithium Nickel Cobalt Aluminum
NMC	Oxid Kobaltnatý Lithium-Nikl-Mangan	Lithium Nickel Manganese Cobalt oxide
NO ₂	Oxid Dusičitý	Nitrogen Dioxide
NO _x	Oxidy Dusíku	Oxides of Nitrogen
NPSE	Národní program snižování emisí	-
OB	Obchodní blok	-
OP	Ostrovní provoz	-
OZE	Obnovitelné zdroje energie	-
PHEV	Plug-in hybridní elektrická vozidla	Plug-in Hybrid Electric Vehicle
PM _x	Suspendované částice o průměru x μm	Particulate Matter
PpS	Podpůrné služby sítě	-
PS	Přenosová soustava	-
PVE	Přečerpávací vodní elektrárna	-
PDS	Provozovatel distribuční soustavy	-
RE	Regulační energie	Regulation energy
RK	Rezervovaná kapacita	
RR	Zálohy pro náhradu	Replacement reserves
RRP	Proces náhrady záloh	Reserve replacement process
SEK	Státní energetická koncepce	-
SoC	Úroveň nabití bateriového článku	State of Charge
SoH	Technický stav bateriového článku	State of Health
SRUQ	Sekundární regulace U/Q	-
SVR	Služby výkonové rovnováhy	-
SyO	Systémová odchylka	-
SyS	Systémové služby	-
TCO	Celkové náklady vlastnictví	Total Cost of Ownership
TMS	Systém řízení teploty	Thermal management system
UPS	Záložní zdroj energie	Uninterruptible Power Supply
VE	Vodní elektrárna	-
VOC	Těkavá organická látka	Volatile organic compounds
VTE	Větrná elektrárna	-
VVN	Velmi vysoké napětí	-
VN	Vysoké napětí	-
xEV	Elektromobil	Electric vehicle

1. Úvod

Celá Evropa zažívá v současnosti silný ekonomický růst. Tento růst má za následek zvyšování kvality lidského života, růst HDP a také rychlý rozvoj všech odvětví moderního průmyslu. Nedílnou součástí téměř každého průmyslového odvětví je doprava. Doprava je jedním z nejdůležitějších sektorů národního hospodářství a jeho rozvinutost přímo ovlivňuje budoucí tempo růstu ekonomiky zemí a jejich konkurenceschopnost v tržní politice. Právě z těchto důvodů jsou dnes kladeny na dopravu stále vyšší požadavky, a to zejména na její efektivitu, snižování energetické náročnosti, objem přepravních výkonů jak osobní, tak nákladní dopravy a v neposlední řadě důraz na snižování jejího negativního vlivu na životní prostředí. Struktura moderní dopravy ve většině zemí EU je však stále velice nepříznivá z důvodu dominance silniční dopravy. V České republice se silniční doprava dle **Studie o vývoji dopravy z hlediska životního prostředí v České republice za rok 2016** [1] podílela na celkových přepravních výkonech v osobní dopravě zhruba 82 % a v nákladní dopravě zhruba 76 %.

V silniční dopravě mají stále majoritní zastoupení vozidla, která využívají klasické spalovací motory. Tyto motory spotřebovávají uhlovodíková paliva z fosilních zdrojů a jsou tedy výrazným zdrojem emisí znečišťujících látek ovzduší a emisí skleníkových plynů. Stávající silniční doprava má velký podíl na produkci zdravotně či environmentálně závadných emisí, a to zejména PM, CO₂, NO₂, NO_x, VOC, CO a B(a)P. V České republice dle Národního akčního plánu čisté mobility [2]: „Sektor „silniční doprava“ představuje v současné době cca 19 % celkových emisí oxidů dusíku, cca 14 % celkových emisí NM-VOC, cca 9 % celkových emisí primárních částic PM₁₀, cca 10 % celkových emisí primárních částic PM_{2.5} a cca. 7 % celkových emisí benzo(a)pyrenu.“



Graf 1 - Složení osobních motorových vozidel v ČR [1]

Z Graf 1 vyplývá, že je v České republice velice zastaralý vozový park v sektoru osobních vozidel. Nevyhovující stáří vozového parku má za následek několikanásobně vyšší hladiny koncentrací emisí škodlivých látek v ovzduší, a to hlavně v oblastech velkých měst s vysokou hustotou osídlení a v oblastech přilehlých hustých silničních sítí s vysokou dopravní náročností. V těchto aglomeracích se v České republice dlouhodobě nedaří dodržovat imisní limity právě pro vysoce škodlivé a nebezpečné PM₁₀, PM_{2,5} a B(a)P. [3] V České republice se mezi tyto aglomerace dle výsledků dlouhodobého měření imisních limitů řadí Ústecký kraj, Olomoucký kraj, Zlínský kraj a Středočeský kraj, Brno a nejvíce zasaženou oblastí je Praha.

Tyto negativní dopady současného stavu silniční dopravy v ČR je nutné do budoucna výrazně omezit či absolutně eliminovat. Za tímto účelem několik strategických dokumentů České republiky (NAPCM, SEK, NPSE) v návaznosti na směrnici Evropského parlamentu a Rady 2014/94/EU o zavádění infrastruktury pro alternativní paliva definuje své plány, vize a strategie pro budoucí vývoj silniční dopravy. Dokumenty stanovují cíle zejména v oblasti zrychlené obměny vozového parku, podpory vývoje technologií pro zvyšování účinnosti a šetrnosti současných spalovacích motorů, snižování spotřeby motorové nafty na konečné spotřebě pohonných hmot a s tímto požadavkem pokles využívání automobilů s pohonem na motorovou naftu. Tyto cíle mají do budoucna přispět k dekarbonizaci dopravy a snížení její závislosti na ropných produktech. Jako odezvu na tento plánovaný pokles definuje SEK [4] jeden z nejdůležitějších cílů v silniční dopravě do budoucna a to: „*Růst podílu alternativních paliv (biopaliva, stlačený zemní plyn (CNG), elektrická energie, experimentální vodíkové články) v dopravě*“. Právě využívání elektrické energie v dopravě ve formě elektromobility zaznamenává v posledních letech velice rychlý technologický pokrok. Do budoucna se dá tedy předpokládat, že se elektromobilita stane dynamicky rozvíjejícím sektorem silniční dopravy, a to zejména po roce 2020, kdy by měla být dle plánů NAPCM [2] již dostatečně rozvinutá příslušná infrastruktura dobíjecích stanic. Na konci strategického období datovaného do roku 2020 by měl roční prodej elektrických vozidel dosáhnout hranice 7 tisíc ks. Tato hodnota by znamenala 3% podíl prodeje xEV na celkovém ročním prodeji nových vozidel na českém trhu. Při tomto scénáři by mělo v roce 2020 jezdit po silnicích v České republice dohromady **17 tisíc elektromobilů**. Z toho 6 tisíc čistě bateriových elektrovozidel a 11 tisíc tzv. plug-in hybridů. Dle tohoto počtu elektromobilů by se mohla pohybovat celková kapacita jejich baterií někde okolo **400 MWh** v závislosti na hodnotě kapacity baterií, které budou v elektromobilech využívány.

S tímto budoucím růstem podílu elektromobility v dopravě je spjatý i rychlý nárůst produkce elektromobilů a v nich využívaných akumulátorů. Za současného technologického stavu baterií představují baterie stále nejvyšší položku nákladů na celkové pořizovací ceně elektromobilu. Tato skutečnost je ještě zatížena faktem, že životnost aktuálně využívaných baterií dosahuje 5 až 7 let. Po skončení životnosti není již možno baterii díky snížené kapacitě nadále využívat pro napájení motoru elektromobilu. Pokud vezmeme v úvahu, že v roce 2020 by mělo být v České republice zhruba 17 tisíc

elektromobilů, budeme okolo roku 2025 disponovat minimálně stejným počtem vyřazených baterií. Jelikož je celý výrobní proces těchto akumulátorů velice technologicky, ekonomicky i environmentálně náročný, vzniká tak kritická otázka, jak s tímto v budoucnu vysokým počtem vyřazených baterií co nejlépe ekologicky a ekonomicky dále naložit.

Právě touto důležitou otázkou se budu v mé diplomové práci zabývat. Za tímto účelem bude nejprve provedena analýza současně využívaných baterií v elektromobilech. Poté bude zpracováno zhodnocení technických a ekonomických parametrů vyřazených akumulátorů. Vzhledem k těmto zjištěným parametrům a stavu vyřazených baterií realizuji kritické vyhodnocení možností budoucího využití vyřazených baterií. Potencionální možnosti opětovného využití těchto vyřazených baterií můžeme nalézt v mnoha stacionárních aplikacích. Dle mého názoru mohou být tyto baterie opětovně využity jak na úrovni domácností, malých a středních podniků, tak na úrovni distribuční soustavy či přenosových soustav. Do budoucna naleznou vyřazené baterie nejpravděpodobněji využití jako:

- lokální domácí úložiště ve spojení s obnovitelnými decentrálními zdroji a elektromobilitou,
- úložiště elektrické energie pro ostrovní systémy,
- regulace napětí a frekvence v distribuční soustavě,
- vyrovnávání zatížení distribuční soustavy,
- nástroje pro vyhlazování spotřeby elektrické energie (Peak-shaving),
- záložní zdroje a zdroje pro start ze tmy (UPS, Blackstart).

V této práci se podrobněji zaměřím na jednu z výše uvedených možností a provedu její návrh a kritické technicko – ekonomické zhodnocení provozu vybraného systému. Za hlavní cíl této práce si kladu nalézt odpověď na otázku: **„Jsou vyřazené baterie opravdu vhodné pro další využití a za jakých podmínek?“**

2. Elektromobilita

V této kapitole bude provedena analýza současného stavu elektromobility v ČR a jeho možného budoucího vývoje a s ním spojenými plány do roku 2030 dle NAPCM. Mezi hlavní globální faktory rozvoje a investic do elektromobility řadíme:

- Regulace emisí CO₂ v návaznosti na Kjótský protokol¹ a politiku EU
 - snížení emisí CO₂ z automobilové dopravy o 30 % do roku 2030 v porovnání s rokem 2021.
- Požadavek na zvýšení kvality ovzduší se zaměřením na hustě osídlené aglomerace
 - emisní normy EURO, limitní hodnoty gCO₂/km a omezení vjezdu vozidel do centra měst nesplňujících povolené emisní limity.

¹ Mezinárodní smlouva k Rámcové úmluvě OSN o klimatických změnách, závazek snížení skleníkových plynů

- Snížení emisí hluku v centru velkých měst.
- Snížení závislosti na dodávkách ropy zejména z politicky nestabilních oblastí.

2.1. Legislativní rámec elektromobility

Rozvoj využívání alternativních paliv v dopravě není pouze ekologickým trendem. Jak již bylo řečeno, budoucí rozvoj elektromobility je zaštiťován několika státními strategickými dokumenty. Tyto dokumenty vznikají také v návaznosti na plnění cílů stanovených Nařízením Evropského parlamentu a rady (ES) č. 443/2009 ze dne 23. dubna 2009. Toto nařízení stanovuje výkonnostní emisní normy pro nové osobní automobily v rámci integrovaného přístupu Společenství ke snižování emisí CO₂ z lehkých užitkových vozidel.

Tento dokument stanovuje cíle na snížení průměrných emisí z nově prodávaných osobních automobilů a lehkých užitkových vozů. Toto snižování průměrných emisí vyvíjí tlak zejména na výrobce automobilů, kteří musí stanovené limity striktně dodržovat. Emisní limity jsou chápány jako průměrné roční emise CO₂ nově prodaného vozového parku každého výrobce automobilů, které jsou v dané zemi registrovány. Aktuálně je dle nařízení stanoven cíl průměrné emisní stopy nového vozového parku 130 g CO₂/km. V roce 2020 nabyde platnosti cíl průměrných emisí 95 g CO₂/km. [5] Při nesplnění průměrných ročních specifických emisí CO₂, je uložen výrobcí Komisí poplatek za překročení emisního cíle. Jelikož je výzkum technologií pro nová vozidla se spalovacími motory s nízkými emisemi CO₂ velice nákladný a automobily stále překračují hodnotu limitu 95 g CO₂/km, jsou výrobci nuceni produkovat bezemisní automobily, aby snížili svou průměrnou hodnotu emisí CO₂ napříč vozovým parkem. Výše sankcí udělovaných výrobcům za překročení emisních limitů pro produkci gramů CO₂/km, která nabývá účinnosti od roku 2019, je dle nařízení stanovena následovně:

$$\text{Platba} = \text{překročení emisí} \times 95 \frac{\text{EUR}}{\text{gCO}_2/\text{km}} \times \text{počet nových vozidel}, \quad (1)$$

- *překročení emisí znamená průměrnou hodnotu vypouštěných emisí celého nově prodaného vozového parku v gCO₂/km nad stanovou emisní hodnotu 95 gCO₂/km.*

Pokud se na sankce pokusím zaměřit z praktického hlediska a budu uvažovat, že průměrná spotřeba konvenčního nového vozu v roce 2018 je 5,5 litru/ 100 km a současně je průměrně při spálení jednoho litru paliva uvolněno do ovzduší 2510 gramů CO₂, pak by zmíněný automobil měl emisní stopu 138 gCO₂/km. Tato hodnota nesplňuje budoucí emisní cíle Nařízení Evropského parlamentu a daný výrobce by byl po roce 2020 sankciován v případě, že by tato auta tvořila 100 % jeho nově prodaných vozů. Z tohoto důvodů bude muset každý výrobce zvolit vyvážený mix druhů nově prodaných vozidel a zařadit do něho odpovídající počet nízkoemisních či bezemisních vozidel. Aby se výrobce po roce 2020 vyhnul sankcím za překračování emisních limitů, měl by svůj nově prodávaný vozový park stanovit dle následující rovnice č. 2.

$$Vozový\ park_{optimum} = \frac{\sum_1^n EF_{n_{km}} \times počet\ aut_n}{\sum_1^n počet\ aut_n} = 95 \frac{gCO_2}{km}, \quad (2)$$

kde

$EF_{n_{km}}$	emisní faktor vozidla druhu n [gCO_2/km]
$počet\ aut_n$	počet prodaných aut druhu n
n	celkový počet prodáváných druhů aut.

V případě, že by určitý výrobce prodal v daném roce celkem 100 vozidel a prodával by pouze vozidla dvou druhů, můžeme si vhodné složení tohoto výrobce spočítat. Jako první druh by měl k dispozici zmíněné konvenční vozidlo spalující naftu s uhlíkovou stopou 138 gCO_2/km a jako druhé by měl k dispozici **bateriový elektromobil s uhlíkovou lokální stopou 0 gCO_2/km** . V tomto případě by jeho optimální prodáváný vozový park po roce 2020 vypadal následovně:

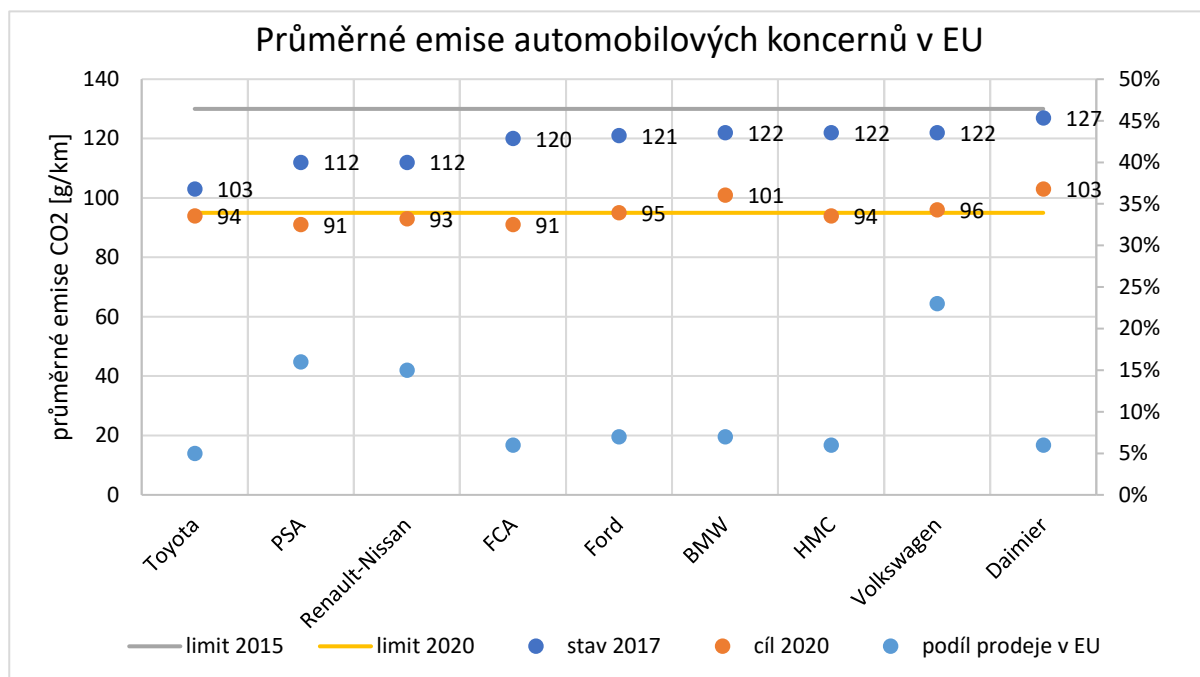
$$Vozový\ park_{2020} = \frac{69 \times 138 + 31 \times 0}{100} = 95 \frac{gCO_2}{km} \quad (3)$$

Z tohoto výpočtu vyplývá, že by výrobce musel v daném roce prodat 69 % konvenčních aut se spalovacími motory a 31 % čistě bateriových elektromobilů. Tento příklad pouze demonstruje vliv stanovených emisních cílů po roce 2020 na změnu strategie prodeje a produkce typů automobilů. Ve skutečnosti je prodáváný vozový park výrobců složen z mnohem většího množství druhů automobilů s rozdílnými emisními faktory na jeden ujetý kilometr.

2.1.1. Současný stav emisí vozových parků v EU

Pro přiblížení současného stavu vypouštěných emisí v EU provedu analýzu aktuálních emisních faktorů vozových parků největších automobilových výrobců za rok 2017. Jelikož je automobilových značek, které se podílejí na prodeji osobních automobilů na území EU velký počet, provedu analýzu automobilových koncernů dle jejich průměrných emisí přes všechny značky, které pod ně spadají. Výsledky této analýzy jsem vynesl do *grafu 2*. Z hodnot průměrných emisí jednotlivých koncernů je patrné, že všechny splňují aktuální emisní limity z roku 2015, tedy 130 gCO_2/km . Automobilové koncerny se zaměřují na snižování emisního faktoru svých vozidel a stanovují si interní cíle, kterých chtějí do roku 2020 dosáhnout. Jak je vidět, koncerny Daimler a BMW mají stanovený cíl emisí do roku 2020 vyšší než je povolený emisní limit 95 g/km . To je zapříčiněno tím, že pod tyto koncerny spadají luxusní značky Mercedes a BMW, které se nechtějí vzdát svých dlouhodobě nastavených standardů prestižních aut s velkoobjemovými motory a počítají s přijmutím budoucích sankcí. V roce 2017 bylo v zemích EU prodáno 840 tisíc vozů značky Mercedes-Benz a 822 tisíc vozů značky BMW. Pokud by byl objem prodaných aut po roce 2020 stejný, Mercedes-Benz by byl nucen zaplatit sankci ve výši 760 euro za každý vůz a BMW sankci ve výši 570 euro za vůz. To by ve výsledku znamenalo, že by byla celkově Mercedesu udělena pokuta za překračování emisních limitů ve výši necelých 664 milionů euro

a BMW ve výši 468 milionů euro. Tyto pokuty by se pravděpodobně promítly do ceny prodávaných vozů těchto značek. [6]



Graf 2 - Průměrné emise vozových parků automobilových koncernů v EU

2.2. Dopad elektromobility na životní prostředí

S rozvojem elektromobility je také nutné upozornit na fakt, že provoz elektromobilů je sice bezemisní, ale pouze ve výsledném provozu v dané lokalitě. Jedná se tedy o nulovou lokální emisní stopu. Elektrická energie, kterou však využívají elektromotory pro pohon elektromobilů je vyráběna z různých energetických zdrojů, jejichž provoz už nemusí být zdaleka tak šetrný k životnímu prostředí. Výsledná “čistota“ elektromobility, její budoucí vliv na životní prostředí a snížení hodnot emisí CO₂ úzce souvisí s energetickým mixem dané země. V České republice zatím v energetickém mixu převládá nadále výroba elektrické energie v tepelných elektrárnách. Všechny tyto elektrárny jako palivo využívají hnědé uhlí s výjimkou elektrárny Dětmarovice, která k výrobě elektrické energie využívá spalování černého uhlí. Tento způsob výroby elektrické energie má nejvyšší roční produkci emisí CO₂. Konečný podíl těchto zdrojů na celkové roční vyrobené elektrické energii v energetickém mixu ČR byl za rok 2017 necelých 47 %. [7] Právě z tohoto důvodu je konečná produkce emisí CO₂ při výrobě elektrické energie v ČR na vysoké úrovni. Emisní faktor CO₂ jednotlivých typů zdrojů není lehké přesně určit, jelikož některé energetické zdroje produkují emise přímo při výrobě elektrické energie a u některých zdrojů, zejména u OZE musíme počítat uhlíkovou stopu během jejich celého životního cyklu.

Pro stanovení, zdali je provoz xEV v porovnání s provozem vozidel na ropná paliva opravdu ekologičtější, provedu výpočet uhlíkové stopy výroby elektrické energie ze stávajících energetických zdrojů v ČR dle podílu na konečné výrobě elektrické energie a emisního faktoru provozu v gCO₂/kWh

vyrobené elektrické energie. Informace ohledně produkce emisí oxidu uhličitého z jednotlivých typů energetických zdrojů za jejich aktuální technologické úrovně získám ze studie Technology-specific Cost and Performance Parameters, vydané v roce 2015 IPCC². [8]

Tabulka 1 - Podíl typů zdrojů v energetickém mixu ČR a jejich emisní faktor CO₂

Palivo/ typ elektrárny	Hnědé uhlí	JE	Černé uhlí	Zemní plyn (ostatní plyny)	FVE	PVE,VE	VTE	Bioplyn, Bioamasa
Podíl na výrobě	42%	33%	5%	7%	3%	3%	1%	6%
Emise CO ₂ [g/kWh]	910	18	820	490	41	24	12	230

V tabulce 1 jsou uvedené hodnoty podílů jednotlivých energetických zdrojů na konečné výrobě elektrické energie za rok 2017 v ČR a jejich příslušné produkce emisí oxidu uhličitého na 1 kWh vyrobené elektrické energie. Z těchto dat nyní výpočtem emisního faktoru CO₂ pro složení zdrojů jako celku získám údaj o emisní stopě CO₂ na jednu vyrobenou kWh elektrické energie, kterou zanecháme při aktuální skladbě energetických zdrojů.

$$EF_{celkem} = \sum_{zdroje} EF_{zdroj} \times \text{podíl}_{zdroje} [gCO_2/kWh], \quad (4)$$

kde EF_{zdroj} emisní faktor příslušného energetického zdroje [gCO₂/kWh]
 podíl_{zdroje} podíl příslušného zdroje na celkové vyrobené elektrické energii [%].

Po dosazení hodnot z tabulky 1 do rovnice (4), jsem výpočtem stanovil hodnotu celkového emisního faktoru na 1 kWh vyrobené elektrické energie v ČR na **479 gCO₂kWh⁻¹**. Tuto hodnotu emisní stopy energetického mixu České republiky na vyrobenou kWh elektrické energie můžeme snadno porovnat s vybranými zeměmi EU.

Tabulka 2 - Hodnoty emisních faktorů vybraných zemí EU [9]

země	SE	FR	BE	SP	DE	ČR	PL
emisní faktor v gCO ₂ /kWh	20	40	200	290	410	479	650

Z těchto uvedených hodnot vidíme, že emisní faktor hodnoty vypouštěného CO₂ energetického mixu České republiky je v porovnání s vybranými zeměmi EU na nepříliš lichotivé úrovni. Jediné Polsko překračuje hodnotu České republiky, a to řádově o 200 gCO₂/kWh. Tato vysoká hodnota emisního faktoru je zapříčiněna polským energetickým mixem, kde se až na 90 % celkové vyrobené elektrické energii podílejí tepelné elektrárny spalující uhlí. Naopak nejnižších hodnot vypouštěných emisí CO₂ při výrobě elektrické energie dosahují Švédsko a Francie. Tyto velmi nízké hodnoty jsou ve Švédsku výsledkem podílu 56 % OZE a 42 % JE na celkové vyrobené elektrické energii. V případě Francie je

² Intergovernmental Panel on Climate Change, vědecký mezivládní orgán pro vyhodnocování rizik změn klimatu

hodnota 40 gCO₂/kWh výsledkem jejich jaderné energetiky, v které jsou absolutními lídry v EU a JE se ve Francii podílejí až 75 % na celkové vyrobené elektrické energii.

2.2.1. Stanovení ekologie provozu elektromobilů v zemích EU

Z odlišných hodnot produkce emisí CO₂ energetického mixu jednotlivých zemí EU je jasné, že výsledná ekologičnost provozu elektromobilů se bude také výrazně lišit. Za účelem zjištění reálné “čistoty“ provozování elektromobility vytvořím model vozového parku složeného z 10 modelů současně využívaných elektromobilů. Pro každý model elektromobilu vypočtu emisní stopu, kterou zanechává při provozu ve vybraných zemích EU. Do výpočtového modelu zařadím pět čistě bateriových vozidel, které spotřebovávají pouze elektrickou energii a pět hybridních vozidel, které disponují kombinovanou spotřebou elektrické energie a ropných paliv. Hodnoty spotřeb paliv vybraných modelů elektromobilů zjistím z technických údajů poskytovaných výrobcem. U těchto vozidel je nutno si uvědomit, že výrobce uvádí spotřebu elektrické energie na 100 ujetých kilometrů. Tato hodnota spotřeby elektrické energie však neodpovídá potřebnému množství odebrané elektrické energie ze sítě, jelikož nerespektuje ztráty a účinnost nabíjecí soustavy. Celkovou účinnost procesu nabíjení baterie elektromobilu stanovím pro potřeby výpočtu na hodnotu 91 %. Touto hodnotou provedu korekci hodnoty spotřeby elektrické energie na hodnotu potřebné elektrické energie na ujetých 100 km. Metoda výpočtu korekce spotřeby je v uvedena v následující rovnici (5).

$$E_p = \frac{E_s}{\eta} \text{ [kWh/100km]}, \quad (5)$$

kde E_p celková potřeba elektrické energie na 100 km [kWh/100 km]
 E_s spotřeba elektrické energie na 100 km dle výrobce [kWh/100 km]
 η celková účinnost dobíjecí soustavy se započtením ztrát při nabíjení [%].

Tabulka 3 - Spotřeby vybraných xEV v modelu vozového parku

typ vozidlo	spotřeba el. energie [kWh/100 km]	potřeba el. energie [kWh/100 km]	spotřeba paliva [l/100 km]	emisní stopa ropných paliv [gCO ₂ /km]
BMW i3	11,6	12,7	X	X
Nissan Leaf	13,5	14,8	X	X
VW e-GOLF	11,9	13,1	X	X
Tesla model S 85	16,9	18,6	X	X
Kia Soul EV	13,8	15,2	X	X
Opel ampera	12,5	6,9	2,9	72,8
Toyota Prius	9,9	5,4	2,7	67,8
VW Golf GTE	10,8	5,9	3,6	89,1
AUDI E3 etron	10,3	5,7	4,2	105,4
Mitsubishi PHEV	12,3	6,8	4,4	109,2

V tabulce 3 jsou uvedeny spotřeby elektrické energie jednotlivých modelů elektromobilů a přepočtená hodnota potřebné elektrické energie s respektováním účinnosti nabíjení baterií. Žlutě jsou zvýrazněny PHEV a zeleně BEV. U hybridních elektromobilů jsem z kombinované hodnoty spotřeby ropných paliv

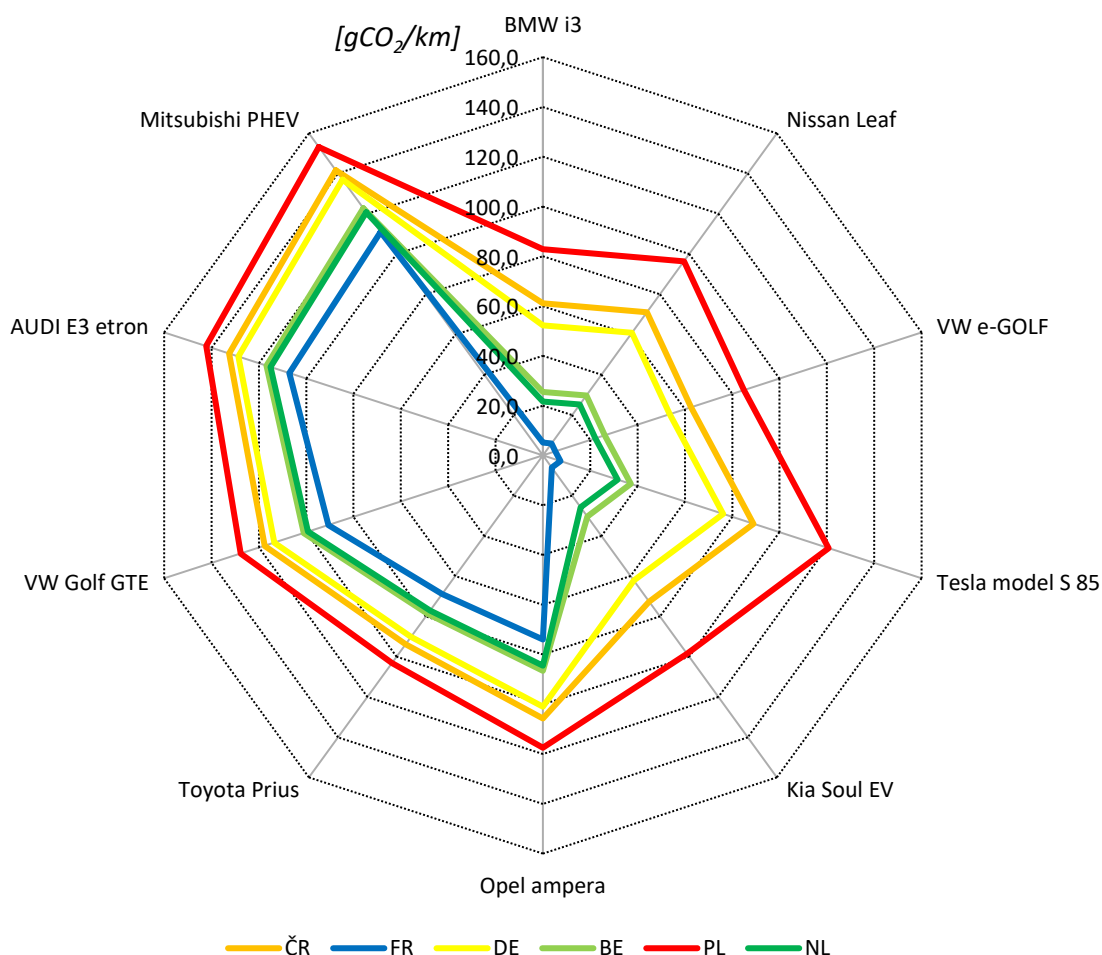
určil jejich emisní stopu ze spalování těchto paliv v gCO₂/km. Pro výpočet množství uvolněných emisí spalováním ropných paliv jsem počítal s množstvím 2510 gramů CO₂ uvolněných na litr spáleného ropného paliva. Pro výpočet celkové emisní stopy provozu elektromobilu dle země, v které jeho provoz uvažuji, jsem si stanovil následující vzorec:

$$EF_{X,EVn} = \frac{Ep_{EVn} \times EF_{total,X}}{100} + \frac{spotřeba_{rop,EVn} \times 2510}{100} \text{ [gCO}_2\text{/km]}, \quad (6)$$

kde

$EF_{X,EVn}$	výsledný emisní faktor EV modelu n, provozovaném v zemi X [gCO ₂ /km]
Ep_{EVn}	potřebná elektrická energie EV modelu n [kWh/100 km]
$EF_{total,X}$	emisní faktor energetického mixu země X [gCO ₂ /kWh]
$spotřeba_{rop,EVn}$	spotřeba ropného paliva EV modelu n [l/100 km].

Výsledky výpočtu uhlíkové emisní stopy vznikající při provozu vybraných modelů elektromobilů v daných zemích jsem pro přehlednost vynesl do následujícího grafu.



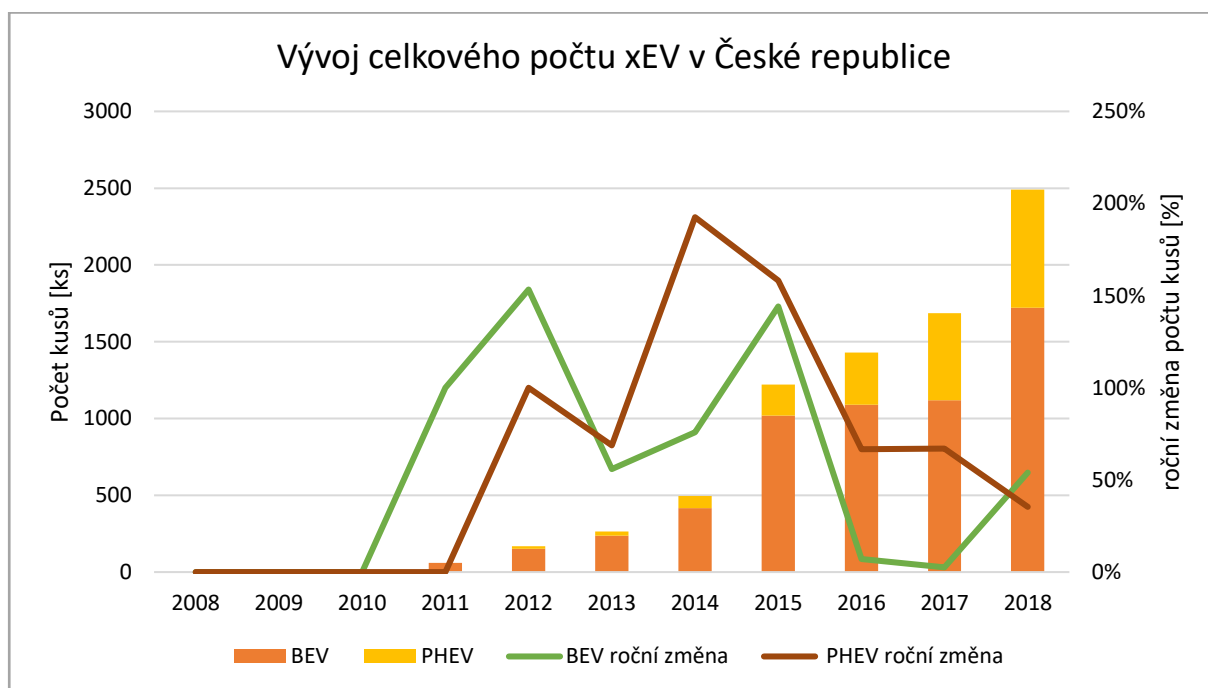
Graf 3 - Uhlíková stopa provozu vozidel xEV ve vybraných zemích EU [gCO₂/km]

Pokud bych uvažoval, že by vozový park v dané zemi byl složen výhradně z těchto uvedených modelů xEV a to ve stejném poměru, výsledný ekologický dopad tohoto vozového parku by byl reprezentován

celkovou plochou ohraničené oblasti v *grafu 3* pro danou zemi. Nejméně ekologická by za těchto předpokladů byla elektromobilita v Polsku. Naopak nejvíce šetrná k životnímu prostředí se jeví elektromobilita ve Francii. Dle těchto výpočtů si dovoluji tvrdit, že ekologičnost provozu elektromobility je přímo úměrná složení energetického mixu. Do budoucna můžeme počítat se zlepšováním této situace v návaznosti na zvyšování podílu OZE na celkovém množství roční vyrobené elektrické energie v zemích EU.

2.3. Současný stav elektromobility v ČR a EU

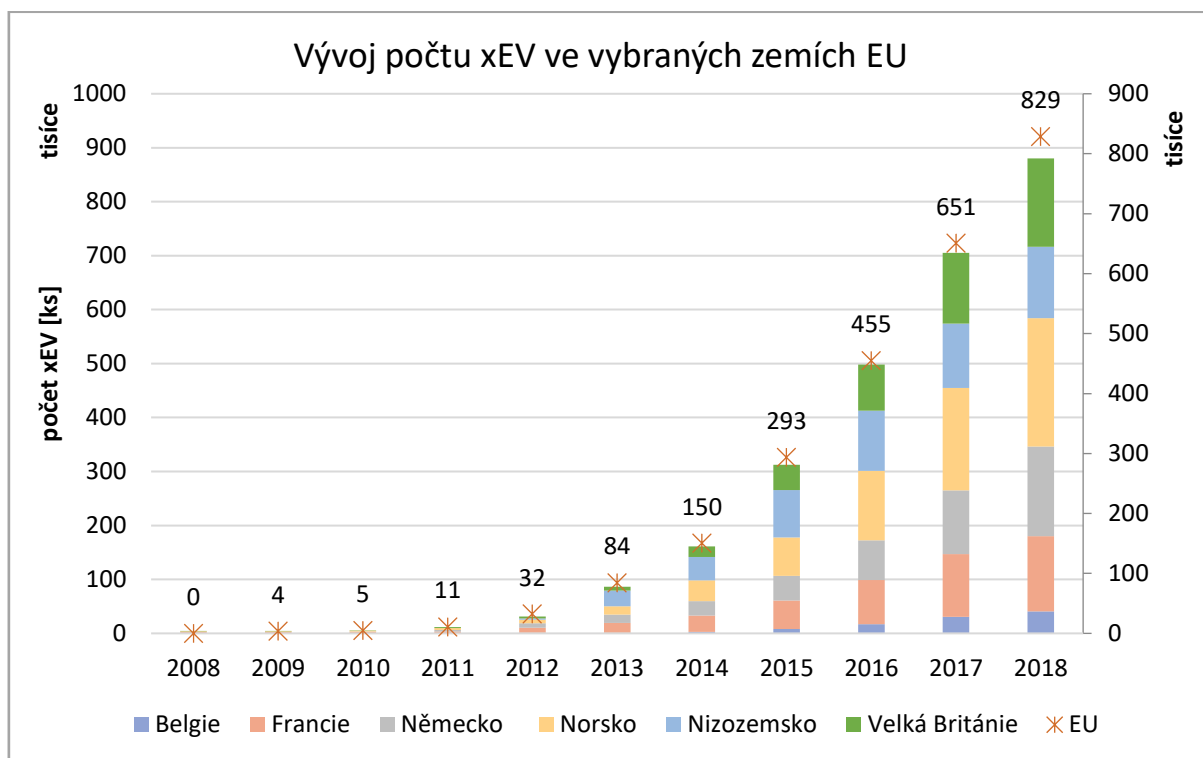
I když se elektromobilita v posledních letech velmi dynamicky rozvíjí, dá se říci, že je v České republice stále ještě v počátcích v porovnání se západními zeměmi EU. Je třeba si uvědomit, že pojem elektromobilita nezahrnuje pouze čistě elektrická vozidla (BEV), ale také tzv. plug-in hybridy (PHEV) a další. V České republice bylo k datu 15. května roku 2018 registrováno celkem 2491 kusů elektromobilů. Z tohoto počtu bylo 1722 kusů elektromobilů čistě bateriových a 769 kusů hybridních elektromobilů. [9] Historický vývoj počtu registrovaných elektrických vozidel pro soukromý sektor přepravy, tedy vozidel kategorie M1 v České republice, znázorňuje *graf 4*.



Graf 4 - Historický vývoj počtu registrovaných elektromobilů v ČR

Jak je vidět, tak celkový počet registrovaných elektromobilů v ČR neustále roste. Nejvyšší meziroční nárůst nově registrovaných elektromobilů byl v České republice zaznamenán v letech 2014 a 2015. Dle počtu elektromobilů je patrné, že aktuálně převládají na českých silnicích čistě bateriové elektromobily. Pro porovnání vývoje a současného stavu elektromobility v ČR oproti zemím EU sestojím graf vývoje pro ty země EU, které se na celkovém počtu elektromobilů v EU podílejí v největší míře a jsou tedy

lídry v této oblasti. Mezi takovéto země Evropské unie patří zejména Nizozemsko, Velká Británie, Německo, Belgie, Francie a Norsko.



Graf 5 - Vývoj počtu xEV v zemích s největším podílem na elektromobilitě v EU

V roce 2018 bylo ve všech členských státech Evropské unie registrováno dohromady téměř 830 tisíc elektromobilů. Z toho bylo 375 tisíc BEV a 454 tisíc PHEV. Uvedených šest zemí se na tomto elektrickém vozovém parku EU podílí společně zhruba 94 %. Největším počtem elektromobilů v EU disponuje Norsko, jehož elektrický vozový park představuje až 10 % celkového vozového parku v zemi v roce 2018 (v Norsku zhruba 2,5 mil. osobních aut). Německo mělo na svém území v roce 2018 registrováno 166 tisíc elektromobilů, Velká Británie 164 tisíc elektromobilů, Nizozemsko s Francií zhruba 135 tisíc elektromobilů a Belgie 41 tisíc elektromobilů. Pro přesnější porovnání současného stavu rozvoje elektromobility v ČR vůči ostatním zemím EU provedu srovnání dle počtu obyvatel na jeden elektromobil. Touto korekcí získám relevantnější výsledek stavu rozvoje elektromobility v ČR oproti pouhému porovnání konečného počtu registrovaných elektromobilů v dané zemi. [9]

Tabulka 4 - Míra rozvoje elektromobility dle ukazatele osob/xEV

země	ČR	Belgie	Francie	Německo	Nizozemsko	Norsko	VB
faktor rozvoje [osob/xEV]	4229	278	480	490	130	22	398

Z hodnot je patrné, že Norsko je lídrem v této oblasti právem, jelikož na jeden elektromobil připadá pouze 22 obyvatel. Naopak v České republice připadá na jeden elektromobil 4229 obyvatel. Z těchto čísel je jednoznačně patrné, že současný stav elektromobility v ČR výrazně zaostává.

2.3.1. Důvody současného stavu rozvoje elektromobility v ČR

Důvodů současného nevyhovujícího stavu rozvoje elektromobility v České republice je mnoho. Mezi hlavní důvody pomalého tempa růstu počtu elektromobilů v ČR řadím následující:

1. Pořizovací cena elektromobilu

Pořizovací cena elektromobilu je v porovnání s konvenčními automobily na ropná paliva vyšší. Vysoká pořizovací cena elektrických osobních vozidel je způsobena hlavně současnou technologií baterií, která je stále velice nákladná a výsledná cena baterií je tedy vysoká. Podíl nákladů na baterii se v současnosti pohybuje někde okolo 35 % z celkových nákladů na výrobu elektromobilu.

2. Absence dostatečného regulatorního rámce

V České republice je momentálně úplná absence vhodného schématu podpory elektromobility pro největší potenciální skupinu žadatelů, kterými jsou fyzické osoby. Vláda České republiky již navrhla v Akčním plánu o budoucnosti automobilového průmyslu v ČR jisté kroky pro zvýhodnění majitelů elektromobilů, jako jsou např. osvobození elektromobilů od dálničních poplatků, poplatků za registraci vozidla. Dalším uvažovaným návrhem je zavedení motivačního faktoru pro majitele elektromobilů ve formě zvýhodněného režimu ve městech (bezplatné parkování, vjezd do míst s omezeným vjezdem). Navzdory všem těmto návrhům přímá podpora nákupu xEV pro fyzické osoby bohužel v České republice stále chybí.

Přímé podpory na pořízení elektromobilů a příslušné infrastruktury se v ČR dočkaly podnikatelské subjekty od roku 2017, kterým byla nabídnuta dotace z programu Podpory nízkouhlíkové energie – elektromobility pod záštitou **OPPIK**³. Z tohoto programu byla podnikatelům poskytnuta celková dotace ve výši 250 milionů Kč, která byla rozdělena celkem do tří výzev, které postupně vyhlášovalo MPO. Přímá dotace na pořízení elektromobilu se pohybovala ve výši 24 % až 33 % z pořizovací ceny elektromobilu a na příslušnou infrastrukturu, tedy na nabíjecí stanice, bylo možné získat dotaci až do výše 80 % pořizovacích nákladů. [10] Aktuálně od 1.4.2018 probíhá IV. výzva pro žadatele o dotační podporu pro podnikatelské subjekty v programu Nízkouhlíkaté technologie – elektromobilita.

3. Omezená nabídka elektromobilů, trh elektromobility stále ve stádiu zrodu

Česká republika není v současnosti pro velké výrobce a dodavatele elektromobilů příliš atraktivní, a to zejména z důvodu nízké poptávky právě po xEV v porovnání se západními zeměmi EU. Z tohoto důvodu je na českém trhu s elektromobilitou omezená nabídka modelů xEV ve všech segmentech trhu. Trh elektromobility je stále málo likvidní a není plně komerční.

³ Operační program Podnikání a inovace pro konkurenceschopnost

4. Absence odpovídající dobíjecí infrastruktury

Stávajícím velkým problémem rozvoje elektromobility v České republice je současná malá hustota nabíjecích stanic pro xEV. Největším problémem v této oblasti je malý počet rychlonabíjecích stanic⁴, které z celkového počtu 769 dobíjecích míst představují pouze 196 míst. Dalším záporným aspektem infrastruktury elektromobility je srovnání počtu veřejných nabíjecích stanic v porovnání s počtem veřejných čerpacích stanic. Česká republika má jednu z nejvíce hustých sítí čerpacích stanic v EU; v roce 2018 jich bylo bezmála 4000. Z tohoto důvodu jsou uživatelé osobních aut zvyklí na určitý standart a komfort, kterému bude muset dobíjecí infrastruktura konkurovat.

5. Sociální nedůvěra a nízká citlivost obyvatelstva na problematiku ekologie

Tento negativní faktor pohledu na elektromobilitu je zapříčiněn zejména omezenými zkušenostmi skutečných uživatelů s elektromobily, kteří mají negativní názory např. na omezený dojezd elektromobilů, výdrž baterií, bezpečnost či zásobování energiemi. Elektromobilita se jako každé nové téma setkává s nedůvěrou, která se musí postupem času odstranit např. kladnou propagací, výsledky a zkušenostmi reálných uživatelů. Dalším specifickým problémem v ČR, který brání plánovanému rozvoji elektromobility, je nízká citlivost obyvatelstva k tématům ekologie, životního prostředí a emisím CO₂.

Všechny tyto uvedené důvody současného stavu elektromobility můžeme chápat jako závažné překážky plánovaného rozvoje využívání elektrické energie v dopravě v ČR a musí být eliminovány. [2]

2.3.2. Stav podpory elektromobility v zemích EU

Rozvoj elektromobility v ČR je brzděn několika zásadními faktory, které jsme si v předchozí kapitole definovali. Nyní se podívám blíže na důvody, které přispěly k pokročilému stavu rozvoje elektromobility ve vybraných západních zemích EU. Zaměřím se zejména na strukturu dotační politiky, která nejvíce ovlivňuje počet pořízených elektrických vozidel fyzickými osobami. Dalším důležitým faktorem při koupi elektromobilu je dostupnost dobíjecích stanic, zejména těch rychlodobíjecích a jejich celková hustota pokrytí i v lokalitách mimo hustě obydlené aglomerace.

2.3.2.1. Dotační politika a infrastruktura elektromobility v Německu

Jak již bylo zmíněno Německo je v současnosti jednou ze zemí s nejvyšší mírou rozvoje elektromobility a počtu registrovaných elektrických vozidel na svém území. Tento stav vychází z několika základních faktů, a to zejména z výhodného dotačního rámce elektromobility. Nyní uvedu několik výhod a možností dotací, které se pojí s vlastnictvím elektrovozidla v Německu pro fyzické osoby. Následující body byly analyzovány ze zdroje [11].

⁴ Nabíjecí stanice s výkonem $P_{jm} > 22$ kW, která dobíjí baterii přímo a DC dobíjecím proudem.

- **Daňová zvýhodnění vlastníků elektromobilu**

V Německu jsou vlastníci elektrovozidel, jak BEV, tak PHEV osvobozeni od roční silniční daně. Do roku 2015 byla fyzická osoba osvobozena od této daně po dobu 5 ti let od registrace vozidla. Od 1. ledna 2016 se tato doba prodloužila na dobu 10 ti let. V Německu se platí silniční daň dle typu vozidla, paliva, objemu motoru a emisní normy EURO. Majitel průměrného konvenčního naftového vozidla s motorem o objemu dvou litrů zaplatí roční silniční daň zhruba 390 euro.

- **Přímá dotace na pořízení elektromobilu**

Přímé dotace na nákup elektromobilů nejvíce ovlivňují jejich nákup fyzickými osobami. V Německu existuje možnost získání přímé dotace při nákupu bateriového vozidla ve výši 4 000 euro a při nákupu plug-in hybridu ve výši 3 000 euro. Tento dotační program odstartoval v květnu 2016 a plánovaná doba trvání je do května roku 2019. Na toto období je německou vládou vymezen rozpočet na podpory ve výši 600 milionů euro. Základní cíl tohoto dotačního rámce je navýšit počet elektromobilů do roku 2020 na 400 tisíc vozidel.

- **Podpora výstavby dobíjecí infrastruktury**

Za současné situace v Německu funguje také dotační program pro výstavbu veřejných nabíjecích stanic. Vláda na tyto účely vymezila finanční zdroje ve výši 300 milionů euro, kterými hodlá mezi roky 2017 a 2020 podpořit výstavbu až 10 tisíc běžných dobíjecích stanic a 5 tisíc rychlonabíjecích DC stanic. Pro běžné veřejné dobíjecí stanice do výkonu 22 kW je určena investiční dotace ve výši 3 000 euro. Rychlonabíjecí DC stanice s výkonem do 100 kW jsou podporovány dotací 12 000 euro a DC stanice s výkonem nad 100 kW získají dotaci 30 000 euro. V současné době disponuje Německo na svém území více než 26 tisíci dobíjecích stanic a z toho zhruba 4 tisíce jsou stanice rychlodobíjecí. Dle tohoto počtu dobíjecích stanic připadá aktuálně v Německu 30 dobíjecích stanic na 100 km dálnic a státních silnic. Do roku 2020 by měl počet nabíjecích stanic v provozu dosáhnout na 40 tisíc.

2.3.2.2. Dotační politika a infrastruktura elektromobility v Belgii

Další zemí EU, která má výhodně nastavené podmínky pro majitele či budoucí majitele elektromobilů, je Belgie. Její podpora se zakládá zejména na daňových zvýhodněních majitelů elektrovozidel a na možnosti získání přímé dotace při nákupu elektromobilu fyzickou osobou. Výše podpory a daňových úlev se na území Belgie liší dle regionů, kterých má belgická federace celkem 3, a to Flandry, Wallonie a hlavní město Brusel.

- **Přímá dotace na pořízení elektromobilu**

V Belgickém regionu Flanders je od ledna roku 2016 možnost získání dotace pro fyzické osoby na nákup osobních elektromobilů až do výše 4 000 euro, dle pořizovací ceny elektrovozidla. Od srpna roku 2017

nabízí belgická vláda také dotaci při pořízení elektromobilu na leasing či car sharing, a to až do výše 3 500 euro. Možnost čerpání této dotace je do roku 2019.

- **Daňová zvýhodnění vlastníků elektromobilu**

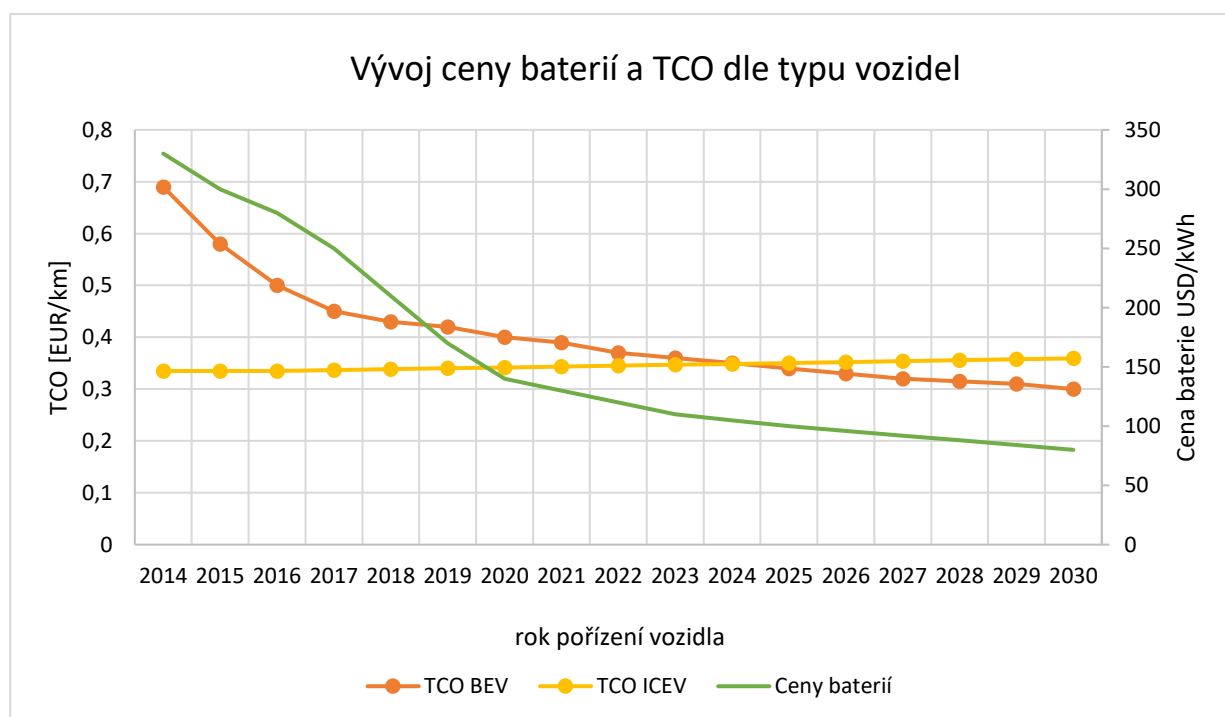
Majitelům xEV registrovaných na území Flanders v Belgii je plně prominuta daň z registrace silničních vozidel. Na území Wallonie a Bruselu je tato daň minimalizována na hodnotu 61 euro. Výše této daně z registrace vozidla se stanovuje dle dopadu na životní prostředí provozu vozidla (emise CO₂, emise tuhých částic, paliva, druh filtru) a dle stáří registrovaného vozidla, počítáno od doby první registrace auta vůbec. Průměrná daň při registraci nového vozidla na ropná paliva se pohybuje rámcově okolo 1 600 euro. Další daňovou úlevou pro majitele xEV je nulová daň za vlastnění vozidla na území Flanders a snížená daň na 77 euro ročně pro regiony Wallonie a Brusel. Za průměrný konvenční naftový automobil se pohybuje tato daň okolo 1 900 euro za rok.

V těchto podkapitolách jsem se zaměřil na dotační a regulační rámec elektromobility ve vybraných zemích EU, a to přesněji v Německu a Belgii. Jak je patrné, je v těchto zemích rámec podpory elektromobility nastaven tak, aby podporoval pořizování elektromobilů fyzickými osobami. Tyto a další výhody, které plynou z vlastnictví elektromobilů a jsou pro většinu západních zemí EU společné, jsou dále např.: bezplatné parkování, využití vyhrazených jízdních pruhů (taxi, autobusy), vjezd do míst s omezeným vjezdem atd. Takto nastavené a fungující dotační rámce podpory elektromobility v zemích EU by se mohly stát jakousi předlohou pro budoucí kroky české vlády s cílem nastavení jasnější podpory pro zrychlený rozvoj elektromobility v ČR.

2.4. Budoucnost elektromobility

Skutečnost, že se elektromobilita stane běžnou součástí naší budoucnosti, je z požadavků na ochranu životního prostředí a snižování negativního vlivu automobilové dopravy více než jasná. Dle aktuálního trendu zpřísňování emisních limitů CO₂ v EU můžeme do budoucna počítat minimálně se stejným klesajícím trendem stanovování limitů. Dle této aktuální situace můžeme odhadnout, že do roku 2025 bude emisní limit stanoven někde okolo hodnoty 75 gCO₂/km a v roce 2030 by mohl nový emisní limit dosáhnout hodnoty až 50 gCO₂/km. Výhledově bychom se mohli v roce 2050 již pohybovat někde okolo 15 gCO₂/km. Tento striktní emisní limit pravděpodobně nastane také v návaznosti na dodržení globálního cíle o omezení celosvětové změny klimatu o dva stupně Celsia dle nařízení Evropského parlamentu a Rady o fluorovaných skleníkových plynech. Budoucí vývoj elektromobility bude kladně ovlivněn také překonáním největších nedostatků současné elektromobility, a to vysokou pořizovací cenou vozidel, rychlostí dobíjení a maximálním dojezdem. Po roce 2020 se předpokládá dosažení konkurenceschopných dojezdů elektrických vozidel v reálném provozu a přechod k jejich využívání i pro vyšší denní nájezdy. Elektromobily se začnou využívat i mimo dopravu ve velkých městech a na krátké vzdálenosti. Reálné dojezdy by se po roce 2020 měli pohybovat okolo 250 až 300 km na jedno

nabití, kdy i doba nabíjení by se měla do budoucna vlivem vhodného battery managementu a rychlodobíjení snižovat a využívání elektromobilů se stane komfortnější pro běžné uživatele. Je nutno však zdůraznit, že nakonec nejdůležitějším faktorem pro nárůst prodeje osobních elektrovozidel je do budoucna snižování TCO⁵ neboli jejich nákladových potřeb. Výše TCO závisí na výši prvotní investice, nákladech během let provozu a také na případné finanční podpoře. Mezi provozní náklady řadíme náklady na palivo, poplatky spojené s vlastnictvím vozidla, servisní poplatky a údržbu. TCO elektrovozidel bude do budoucna i nadále klesat, a to zejména z důvodu poklesu ceny baterií. Ceny baterií se aktuálně pohybují dle technologie lehce pod hranicí 200 USD/kWh, kdy pro srovnání např. ještě v roce 2010 se ceny baterií pohybovaly okolo 800 USD/kWh, v roce 2016 byly však ceny baterií již někde okolo hranice 300 USD/kWh. Z těchto hodnot je patrný jednoznačný technologický pokrok v bateriové technologii. V rozmezí let 2025 až 2030 lze předpokládat prolomení hranice 100 USD/kWh. V případě dosažení takovéto hodnoty ceny baterií dojde téměř k vyrovnání prodejní ceny elektrovozidel s konvenčními vozidly. S přihlédnutím k nižším provozním nákladům elektrovozidel klesne hodnota TCO elektrovozidel (BEV) pod TCO konvenčních vozidel (ICEV). Tímto se stane vlastnictví elektrovozidel v porovnání s konvenčními vozidly ekonomicky rentabilní a pro konečné uživatele ekonomicky atraktivnější. Na následujícím grafu je patrné, že tohoto stavu bude možné dosáhnout zhruba v roce 2024 v závislosti na budoucím vývoji ceny baterií. [12]



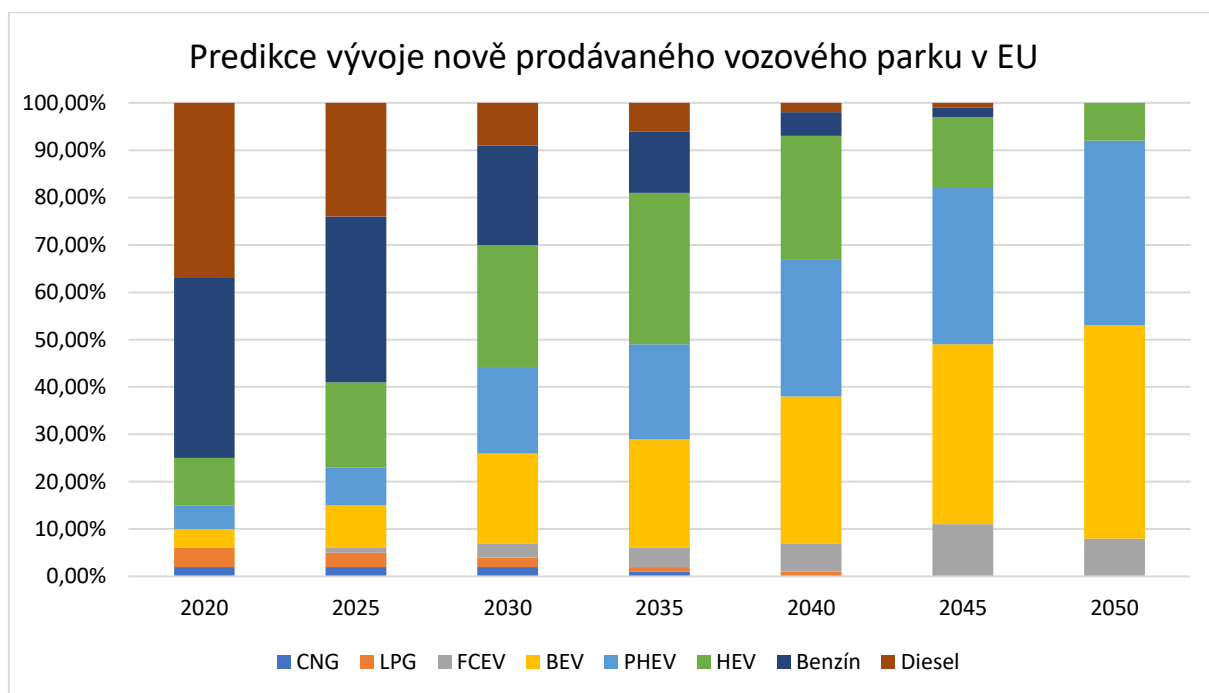
Graf 6 - Vývoj TCO v závislosti na ceně baterií

⁵TCO - Total cost of ownership (celkové náklady na vlastnictví)

Tento graf představuje srovnání TCO průměrného konvenčního automobilu a elektromobilu dle roku pořízení vozidla. Graf je vyobrazen pro elektrovozidlo s baterií 45 kWh, při průměrném ročním nájezdu 21 000 km a celkové době využívání vozidel 15 let. [13]

2.4.1. Predikce budoucího vývoje elektromobility v EU

Jak již bylo analyzováno v kapitole 2.3. *Současný stav elektromobility v ČR a EU*, je aktuální trend rozvoje v mnoha zemích EU, zejména v západních a severovýchodních, na velmi vysoké úrovni. Z tohoto stavu můžeme předpokládat, že pokud nedojde k výrazným změnám politického postoje k elektromobilitě či ke změnám v technologickém vývoji běžných spalovacích motorů, bude tento trend pokračovat i nadále. Z minulé kapitoly můžeme stanovit pro elektromobilitu dva přelomové roky pro její rozvoj a to rok 2020 a později rok 2025, kdy se elektromobilita stane plně konkurence schopná vůči běžně využívaným konvenčním automobilům. Po roce 2025 se v zemích EU očekává již plné rozvinutí trhu s elektrovozidly a postupný nástup vysokého podílu jejich prodeje na celkovém počtu ročně prodaných osobních a lehkých užitkových automobilů. Tento růst by měl vyvrcholit v roce 2050. V následujícím grafu je zobrazena budoucí predikce podílu xEV na ročně prodaných nových vozidlech v EU.



Graf 7 - Predikce vývoje vozového parku v EU

Graf 7 byl sestaven při respektování striktního scénáře pokračování zpřísnování emisních limitů až do roku 2050, tedy dosažení emisního limitu 15 gCO₂/km a příznivého vývoje TCO elektromobilů. Jak je patrné v roce 2050 dojde k úplnému přechodu k tzv. **zero emission vehicle fleet**, což znamená, že v roce 2050 budou mít 100% podíl na nově prodáváném vozovém parku bezemisní vozidla. [13] Tento graf reprezentuje vývoj pouze podle jednoho scénáře, který reprezentuje nástup nejpřísnějších emisích

limitů. Vývoj elektromobility může být však do budoucna o něco pomalejší z důvodu jak politických, tak technologických a v neposlední řadě také finančních.

2.4.2. Budoucnost elektromobility v ČR

V kapitole 2.3.1. *Důvody současného stavu rozvoje elektromobility v ČR* jsem podrobněji analyzoval hlavní příčiny zatím pomalého rozvoje elektromobility v České republice. Pro zlepšení budoucí situace elektromobility je zapotřebí tyto problémy překonat a nastartovat růst zájmu o elektromobilitu zejména u fyzických osob. V této kapitole provedu analýzu plánovaných kroků vlády České republiky k podpoře rozvoje elektromobility a možné budoucí scénáře jejího vývoje.

2.4.2.1. Budoucí opatření pro podporu vývoje elektromobility v ČR

Za účelem překonání hlavních problémů vznikl dokument Akční plán o budoucnosti automobilového průmyslu v ČR. Tento dokument ze září roku 2017 předkládá seznam karet budoucích opatření pro podporu elektromobility v návaznosti na strategické cíle v této oblasti. Jak jsem již v předchozích kapitolách poukázal na možnost inspirace současnou situací podpory elektromobility v ostatních zemích EU, je mnoho z následujících opatření zakládáno právě na těchto opatřeních. Nejdůležitější klíčová opatření v oblasti podpory elektromobility v ČR jsou uvedeny níže.

- **Analyzovat možnosti podpory nákupu a provozu elektromobilů**

Toto opatření má za cíl dosáhnout vhodného rámce přímé podpory nákupu elektromobilů, dlouhodobé daňové či jiné provozní úlevy a zavedení podpory elektromobility ve městech.

- **Zrychlené odpisy na elektromobily**

Opatření zaměřené především na firemní zákazníky a jejich motivaci k nákupu elektromobilů. Cílem je efektivně snížit TCO a zvýšit tak co nejdříve jejich konkurenceschopnost v porovnání s klasickým vozidlem se spalovacím motorem.

- **Analyzovat a umožnit využití operativního leasingu při podpoře nákupu elektromobilů**

Umožnit kombinovatelnost přímé dotace pro nákup elektromobilů s operativním leasingem. S využitím operativního leasingu přichází také rychlejší vytvoření sekundárního trhu elektromobility.

- **Označení elektromobilu pro zvýhodnění v městském provozu**

Zavedení speciálně barevně odlišené značky pro elektromobily, která by následně umožnila preferenční provoz, a to zejména v městském provozu.

- **Podpora nákupu vozidel na alternativní pohony**

Rozvoj podpory dle Výzva č. 13/2016 z NPŽP zejména pro obce, kraje a jimi zřízené organizace a následné rozšíření spektra žadatelů pro co nejvyšší počet zájemců.

- **Osvobození elektrického vozidla od správního poplatku za registraci vozidla**

Návrh na osvobození uživatele od poplatku ve výši 800 Kč za zápis do registru vozidel.

Všechna výše uvedená opatření se týkají přímo cíle navyšování celkového počtu elektromobilů a mají za úkol plnit strategický cíl dle NAPCM, a to zavádění opatření, která budou motivovat významný nárůst podílu nízkoemisních a bezemisních vozidel ve vozovém parku. V dokumentu se nachází ještě dalších pět opatření týkající se elektromobility, která jsou zaměřena na strategický cíl zajištění rozvoje infrastruktury potřebné pro plnohodnotný provoz nízko/bezemisních vozidel. Těmito opatřeními se v této práci nebudu podrobněji zabývat. [10]

2.4.2.2. Predikce vývoje elektromobility v ČR a její možné scénáře

V této kapitole provedu predikci možného vývoje elektromobility v ČR. V budoucnu bude elektromobilita zasahovat do všech segmentů dopravy, pro účely této diplomové práce se však zaměřím pouze na segment nejrozšířenější, a tím je segment osobních automobilů a jeho možné scénáře vývoje. Dle studie o predikci vývoje elektromobility v ČR jsou pro budoucí vývoj elektromobility vypracovány tři možné scénáře. [14]

1.) Nízký scénář

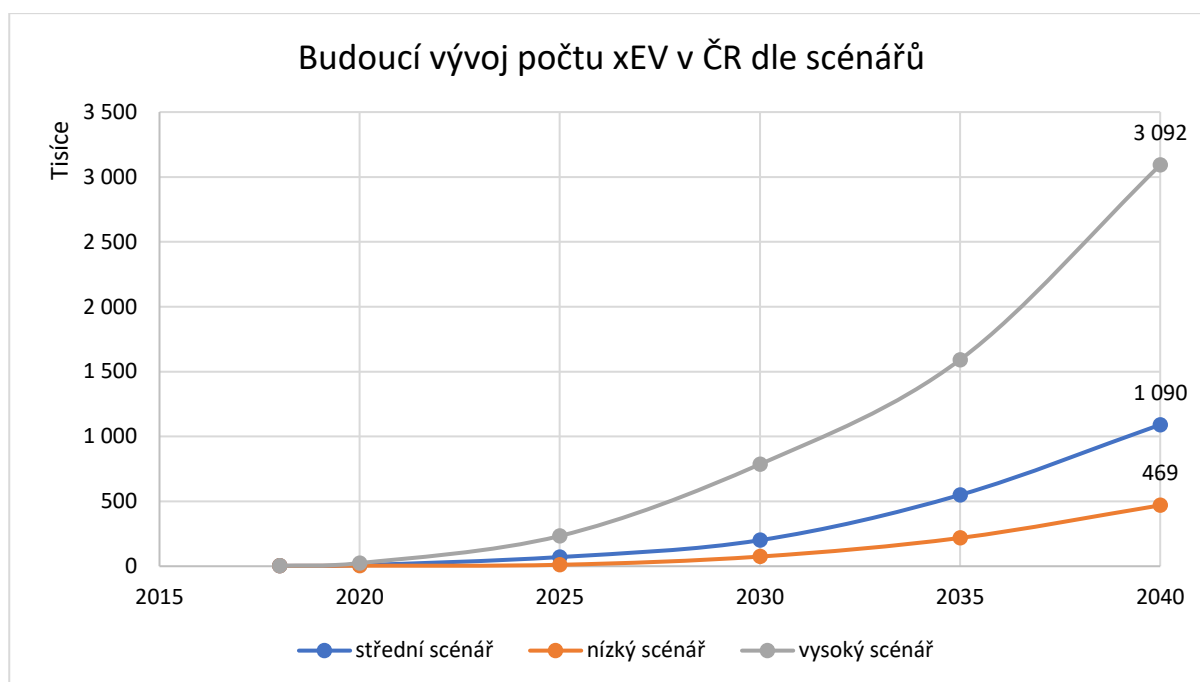
Nízký scénář vychází ze současného meziročního růstu prodejů EV v ČR, z předpokladu negativního vývoje TCO a špatně nastavené státní podpory nákupu elektromobilů. V tomto scénáři byl tento stav zachován až do roku 2025 a od tohoto roku dochází k nárůstu tržního podílu dle NAP CM, který je však o 5 let zpožděn oproti plánům NAP CM. Od roku 2035 je započítáván také dovoz ojetých EV ze zahraničí.

2.) Střední scénář

V tomto scénáři se předpokládá vhodné nastavení podpůrného rámce elektromobility po roce 2020, pokles TCO xEV pod hodnotu TCO ICEV do roku 2025. Od roku 2030 se nepředpokládá dle NAPCM nasycení trhu s elektromobilitou. Dojde tedy k dalšímu navyšování prodejů a také v tomto roce dojde k dovozu ojetých xEV ze zahraničí. V roce 2040 bude podíl elektromobilů na automobilovém trhu zhruba 33 %. **Tento scénář dle předchozích analýz považuji v prostředí ČR za nejreálnější a z tohoto důvodu se budu v následujících částech práce řídit dle predikcí růstu tohoto scénáře.**

3.) Vysoký scénář

Tento scénář navazuje na velice ambiciózní cíl kampaně **EV30@30**, která si klade za cíl dosáhnout tržního podílu EV 30 % na celkových prodejích v roce 2030. Této kampaně se zúčastňují země, které jsou členy EVI (Electric Vehicles Initiative). Mezi tyto země patří Kanada, Čína, Francie, Německo, Japonsko, Nizozemsko, Norsko, Švédsko, Velká Británie a USA. ČR není momentálně členem tohoto uskupení, ale tento scénář je nastaven tak, že předpokládá její budoucí účast. Dle mého názoru je tento scénář pro Českou republiku do budoucna absolutně nesplnitelný, jelikož do roku 2040 předpokládá podíl elektromobility 90 % na nově prodaných osobních vozidlech. Proto tento scénář považuji pouze za nastínění, jak by elektromobilita u nás vypadala v případě tempa rozvoje srovnatelného se zeměmi EU, které jsou v této oblasti lídry.



Graf 8 - Budoucí vývoj počtu xEV v ČR dle scénářů

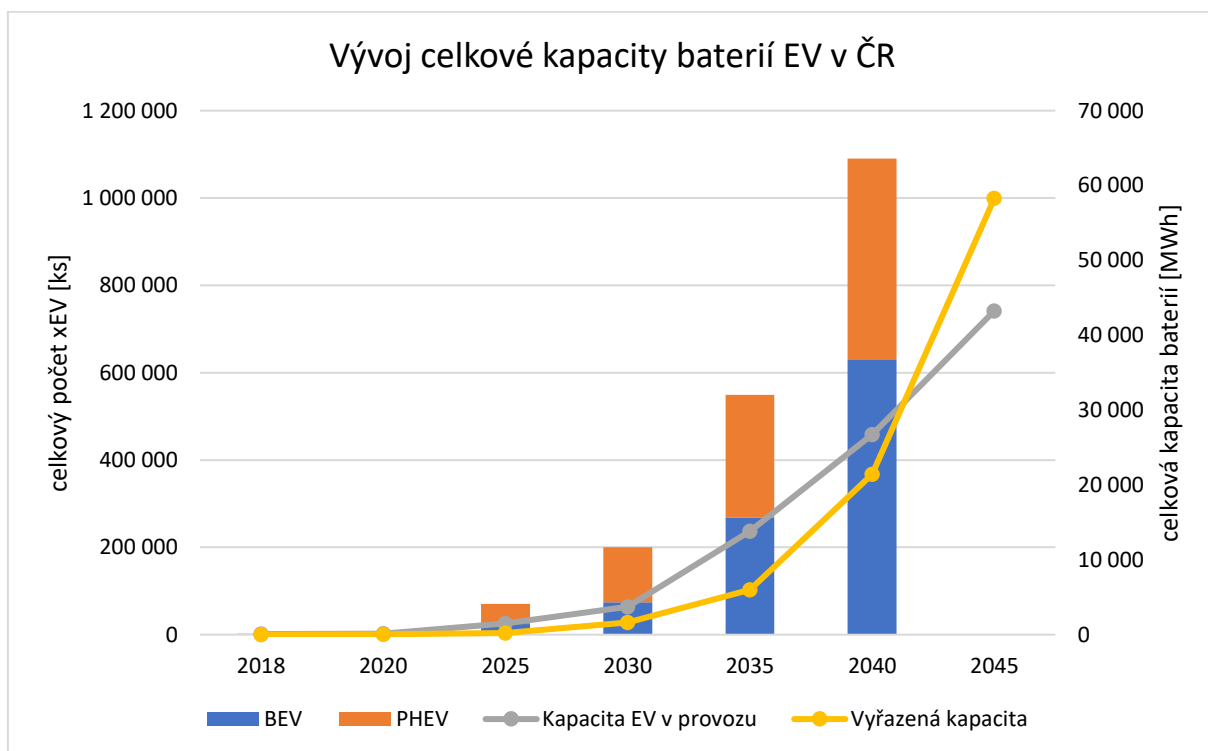
2.4.2.3. Budoucí celková kapacita EV baterií v ČR

Hlavním cílem této práce je nalezení možného využití vyřazených baterií z elektromobilů. Z tohoto důvodu bude absolutně klíčové zjistit, jakou celkovou kapacitou vyřazených EV baterií budeme do budoucna reálně disponovat. Pro odhadnutí celkové budoucí kapacity a kapacity vyřazených baterií sestavím model, který bude počítat s budoucím vývojem elektromobility dle středního scénáře z předchozí kapitoly. Pro potřeby výpočtu celkové budoucí kapacity jsem analyzoval nejprodávanější xEV modely v EU za rok 2017 a následně vypočítal jejich váženou průměrnou kapacitu baterie dle tržního podílu na EV trhu.

Tabulka 5 - Kapacita baterií současných modelů xEV v roce 2017

Nejprodávanější modely xEV a jejich kapacita baterií v roce 2017					
BEV			PHEV		
model	kapacita [kWh]	tržní podíl [%]	model	kapacita [kWh]	tržní podíl [%]
Renault Zoe	22	23	Outlander	12	12
Nissan Leaf	27	13	VW Passat GTE	9,9	9
TESLA Model S	85	12	Mercedes GLC350e	8,8	7
BMW i3	33	11	BMW 225xE Active	6	7
VW e-GOLF	35,8	12	BMW 330e	7,6	7
Tesla model X	90	9	VW Golf GTE	8,7	6
Hyundai Ioniq	30,5	5	Audi A3 e-Tron	8,8	5
Kia SOUL EV	33	4	Volvo XC90	9,2	5
SMART Fortwo ED	17,6	4	Mercedes C350e	6,2	4
VW E-UP!	20	2	BMW i3 Relax	33,2	4
ostatní	37,6	8	ostatní	10	33
vážený průměr	41,8	kWh	vážený průměr	10,2	kWh

Technologie baterií za posledních 10 let zažila velmi rychlý pokrok a kapacity užívaných baterií v elektromobilech neustále narůstají. Tento nárůst je zapotřebí uvažovat i do budoucna a pro účely výpočtů v mém modelu budu simulovat **konstantní nárůst kapacity baterií o 2 % během let** a kapacitu pro BEV budu navyšovat až na průměrnou hodnotu kapacity 60 kWh. Tuto hodnotu volím z důvodu současné průměrné spotřeby elektromobilů 15 kWh/100 km a předpokladu zvyšování celkové účinnosti využití energie z baterie. V budoucnu by proto mohla baterie o kapacitě 60 kWh dosahovat dojezdů až 500 km a více. Tato hodnota je v porovnání se současnými konvenčními automobily absolutně dostačující. Z tohoto důvodu nepředpokládám další navyšování kapacit baterií nad tuto hodnotu. V modelu jsem dále provedl odhad velikosti kapacity vyřazených baterií, tedy kapacity baterií, které jsou stále ještě vyhovující k sekundárnímu využití. V modelu jsem předpokládal, že kapacita vyřazené baterie bude 80 % z původní hodnoty kapacity baterie a každý elektromobil provede výměnu baterie alespoň jednou za dobu jeho životnosti. Jak je patrné z *grafu 9*, kapacita vyřazených baterií je za nárůstem kapacity baterií v provozu opožděna o zhruba 8 let. Toto období jsem počítal jako průměrnou životnost baterie v elektromobilu. Životnost baterie se samozřejmě bude lišit dle denního nájezdu, četnosti cyklů a dobíjecího výkonu. Tyto faktory jsem pro zjednodušení do výpočtu nezahrnoval.



Graf 9 - Odhad budoucí hodnoty kapacit baterií EV v ČR

Z *grafu 9* je patrné, že prvotní větší kapacita pro sekundární využití bude dostupná v období po roce 2025, kdy první elektromobily budou podstupovat výměnu baterií. Poté se celková vyřazená kapacita bude postupně navyšovat a v období od roku 2035 dojde k růstu vyřazené kapacity baterií a bude dosahovat hodnot okolo 10 GWh.

3. Technologie EV baterií

V této kapitole se zaměřím na analýzu základních technických a ekonomických parametrů současně využívaných technologií baterií pro pohon elektrických vozidel. Zjistíte nelze plošně tvrdit, že se veškeré typy baterií dají vhodně využít ve všech aplikacích. Některé baterie jsou svými parametry nevhodné pro využití v současných EV a upřednostňuje se jejich využití např. pro statické aplikace či v konzumní elektronice. Mezi technologie baterií, které se dnes již v oblasti elektromobility nevyužívají, řadíme Lead Acid a NiMH baterie. Tyto typy baterií stály u zrodu prvních elektromobilů, ale brzy přestaly jejich parametry vyhovovat rychlému nárůstu požadavků na nové typy vozidel. I když byly tyto baterie v porovnání s dřívějšími technologiemi Lithium-ion baterií znatelně levnější, nedosahovaly na přísné požadavky na vysokou energetickou hustotu na kilogram váhy baterie. Jejich použití by tedy s sebou neslo výrazně vyšší výsledné hmotnosti vozidel a snížení maximálního dojezdu, což je při aktuálních požadavcích nežádoucí. [15]

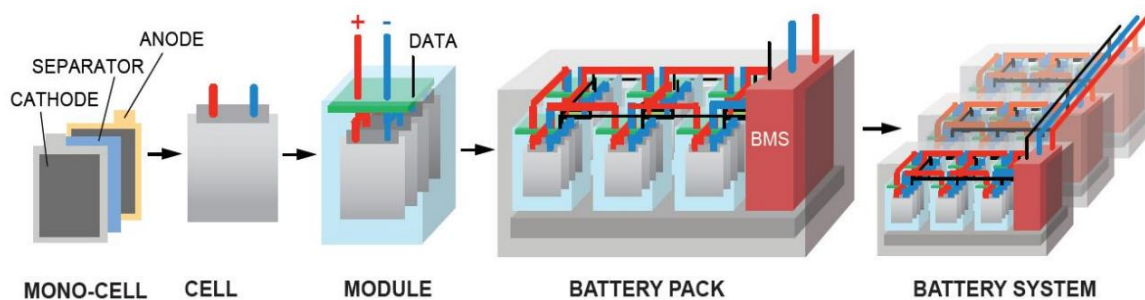
Nyní se v moderních elektromobilech využívá téměř výhradně Lithium-iontových baterií. Mezi největší výhody těchto baterií, které stojí za jejich oblibou, patří jejich vysoká hustota uložené energie, vysoká kapacita baterie, velmi nízké samovybíjení a žádný paměťový efekt⁶ baterie. Současné xEV modely obsahují, až na několik málo experimentálních výjimek, baterie téměř výhradně z následujících šesti technologií, lišících se dle využitého materiálu katody:

- Lithium-Nickel Cobalt Aluminum (NCA),
- Lithium-Nickel-Manganese-Cobalt (NMC),
- Lithium Iron Phosphate (LFP),
- Lithium-Manganese spinel (LMO),
- Lithium Titanate (LTO),
- Lithium Oxide Cobalt (LCO).

Výsledný akumulátor v elektromobilu je složen z velkého množství vhodně spojených základních sekundárních bateriových článků. Tento bateriový článek se skládá z kladné a záporné elektrody, které jsou od sebe odděleny separátorem. Dále článek obsahuje elektrolyt, který představuje vodivé médium pro potřebný pohyb iontů lithia Li^+ při procesu vybíjení a nabíjení článku. Tyto články jsou při výrobě akumulátoru vhodně řazeny do série pro dosažení požadovaného výstupního napětí. Tímto spojením vytvoří bateriové články tzv. bateriový modul, který poskytuje základní ochranu článkům před mechanickým poškozením a elektronický management pro budoucí komunikaci a nutná průběhová měření.

⁶ Nežádoucí efekt u baterií se zápornou elektrodou obsahující kadmium, při kterém dojde k poklesu napětí bateriového článku tzv. druhý vybíjecí stupeň

Následně jsou tyto vzniklé moduly řazeny paralelně pro dosažení výsledné požadované kapacity a jejich spojením vznikne finální battery pack, který je již přímo umístěn v elektromobilu. Těchto battery packů se může v elektromobilu nacházet i více, a to dle požadované výsledné kapacity. Společně spolu tvoří v elektrickém autě tzv. battery system. Jednotlivé battery packy poskytují důležitou funkci battery a thermal managementu. Tyto systémy zajišťují optimalizaci správné činnosti baterie, tedy rovnoměrný průběh nabíjení jednotlivých základních článků a zajišťují bezpečnost provozu, zejména před nebezpečným nadměrným oteplováním baterie vysokými nabíjecími a vybíjecími proudy. [16]



Obrázek 1 - Složení akumulátoru v elektromobilu [17]

Aktuálně se téměř výhradně využívá battery management systém s **pasivním balancováním**, jelikož se jedná o velice levnou a spolehlivou metodu. Tento systém balancování je založen na jednoduchém principu měření stavu jednotlivých bateriových článků a přeměně přebytečné elektrické energie na tepelnou energii, nejčastěji na rezistoru. Aktivní balancování je založeno na principu přenosu energie z více nabitých bateriových článků na méně nabité. Aktivní balancování se v současnosti v EV nevyužívá zejména z důvodu vysoké ekonomické náročnosti a nízké účinnosti balancování.

3.1. Technické parametry baterií

Pro správné zhodnocení jednotlivých baterií dle chemie a technologie bylo zapotřebí provést rozsáhlou analýzu a rešerši všech parametrů současně využívaných bateriových článků. Sběr přesných dat ohledně využívaných bateriových technologií byl velice komplikovaný proces, jelikož je okolo mnoha současných technologií jisté „know how“ výrobce, které bývá přísně střeženo. Často jsem se i ve velmi odborných publikacích či katalozích od výrobců baterií dopátral pouze nepřesných či starších technických údajů, které jsou vzhledem k rychlému vývoji ve světě baterií pro aktuální problémy často nedostačující. Pro co nejpřesnější výsledné hodnoty jsem provedl porovnání z více relevantních zahraničních zdrojů tak, aby byl výsledek hodnocení pro budoucí použití opravdu směrodatný. Porovnání Li-ion bateriových technologií v EV jsem provedl dle následujících parametrů:

- **Jmenovité napětí [V]** – Hodnota napětí zatíženého článku. Tato hodnota je určena středem vybíjecí křivky článku při vybíjecím proudu 0,2C ($I_{vyb} = 0,2 \times \text{kapacita článku [Ah]}$). Výsledné jmenovité napětí baterie je určeno sériovým spojením základních bateriových článků.

- **Pracovní napětí [V]** – Rozsah napětí závislé na nabití článku a jeho zatěžování, tedy rozsah napětí bezpečného provozu bateriového článku. Horní hranice určuje napětí při plném nabití článku a dolní hranice při plném vybití bateriového článku.
- **Specifická energie [Wh/kg]** – Hodnota (množství) uložené energie ku hmotnosti baterie, někdy se také udává **hustota energie [Wh/l]**. Specifická energie je klíčový parametr pro potřeby v oblasti elektromobility. Čím je její hodnota vyšší, tím vyšší dojezdové vzdálenosti a nižší celkové hmotnosti baterie v EV je dosaženo.

$$\text{Specifická energie [Wh/kg]} = \frac{\text{Jmenovitá kapacita [Ah]} \times \text{Jmenovité napětí [V]}}{\text{Hmotnost baterie [kg]}} \quad (7)$$

- **C rate [A]** – Maximální hodnota proudu bezpečného nabíjení a vybíjení baterie. Hodnota C rate se liší právě dle toho, zdali energii do baterie dodáváme nebo ji z baterie čerpáme. S maximální hodnotou discharge C rate souvisí také parametr **specifický výkon [W/kg]**, tedy maximální možný odebíraný výkon v čase z baterie. Čím vyšší je specifický výkon baterie v elektrovozidle, tím vyšší můžeme dosahovat akcelerace.

$$\text{Specifický výkon [W/kg]} = \frac{\text{Vybijecí C rate [A]} \times \text{Jmenovité napětí [V]}}{\text{Hmotnost baterie [kg]}} \quad (8)$$

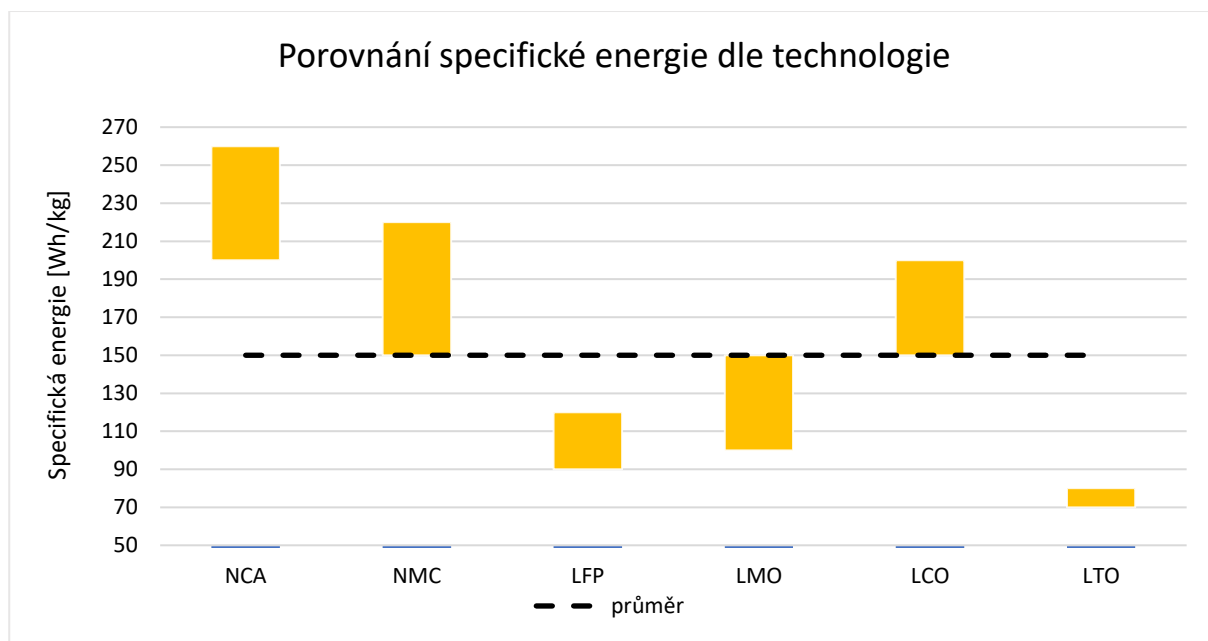
- **Počet cyklů [-]** – Počet cyklů hlubokého vybití na 20 % kapacity baterie od počátku užívání baterie do stavu, kdy její kapacita poklesne na 80 % počáteční hodnoty. Počet cyklů se vždy udává jako interval, jelikož je silně závislý na mnoha faktorech, které ovlivňují výslednou dobu životnosti baterie. Mezi tyto faktory řadíme zejména velikost nabíjecího výkonu, provozní teplotu baterie při nabíjení, vybíjení, a to, jak dlouho je baterie s určitou kapacitou nevyužívána.
- **Tepelný lavinový jev [°C]** – Tento parametr udává hodnotu teploty, při které dojde k lavinovému zvyšování teploty a nevratnému poškození bateriového článku tzv. vyhoření. Anglicky se tento děj nazývá „Thermal runaway“ a značí stav, kdy vlivem procházejícího proudu dochází ke zvýšení teploty článku, a tedy ke zvýšení vnitřního odporu a vzniká neřízená kladná zpětná vazba, která nekontrolovatelně zvyšuje teplotu článku. Čím vyšší hodnota tohoto parametru je, tím je baterie tepelně odolnější.
- **Pracovní teplota [°C]** – Obecně se bezpečné provozní teploty Li-ion baterií pohybují od -20 °C do 60 °C. Pro nejdelší životnost baterie je optimální teplota provozu od 5 °C do 40 °C.
- **Coulombova účinnost [%]** – je účinnost bateriového článku, udána jako poměr mezi energií baterii dodané při nabíjení a energií získané z baterie při vybíjení. Lithium iontové baterie dosahují plošně účinností 98-99 %.

Zpracované a analyzované hodnoty parametrů aktuálních bateriových technologií jsem znázornil do *tabulky 6* na následující straně. Jako důvěryhodné zdroje pro mou analýzu jsem po důkladné rešerši zvolil následující odborné zahraniční publikace [18], [19] a [20].

Tabulka 6 - Srovnání parametrů typů baterií

Technologie článku	NCA	NMC	LFP	LMO	LCO	LTO
Anoda	grafit	grafit	grafit	grafit	grafit	grafit
Katoda	LiNiCoAlO ₂	LiNiMnCoO ₂	LiFePO ₄	LiMn ₂ O ₄	LiCoO ₂	Li ₄ Ti ₅ O ₁₂
Jmenovité napětí [V]	3,6	3,6	3,3	3,7	3,6	2,4
Maximální napětí [V]	4,2	4,2	3,65	4,2	4,2	2,85
Minimální napětí [V]	3	3	2,5	3	3	1,8
Specifická energie	200 - 260 Wh/kg	150 - 220 Wh/kg	90 - 120 Wh/kg	100 - 150 Wh/kg	150 - 200 Wh/kg	70 - 80 Wh/kg
Nabíjecí C rate [A]	1C	0,7 - 1C	1C	0,7 - 1C	0,7 - 1C	1C - 5C
Vybíjecí C rate [A]	1C	2C	1C (pulzně až 25C)	1C - 10C (pulzně až 30C)	1C	1C - 10C
Počet cyklů DoD 80 % [-]	500	1200 - 2000	1000 - 2000	350 - 700	500 - 1000	3000 - 7000
Thermal runaway [°C]	150	210	270	250	150	>300
Požadavky údržby	Nutné chlazení a optimální thermal management, zabránit cyklům s plným nabitím - snížení životnosti					
Od roku	1999	2008	1996	1996	1991	2008
Výhody	Vysoká kapacita	Vysoká kapacita a výkon	Vysoký výkon, vysoká bezpečnost	Vysoký výkon, vysoká bezpečnost	Vysoká kapacita	Dlouhá životnost, rychlé nabíjení
Nevýhody	Nízká tepelná odolnost	Nízká odolnost vůči přebíjení	Nízká kapacita, vyšší samovybíjení	Nízká kapacita, krátká životnost	Nízká tepelná stabilita a	Velice nízká hustota energie
Použití	Tesla EV	BMW, Hyundai, Kia	Citroen, vhodné pro stacionární aplikace	Nissan Leaf, první EV modely	Elektronika, malé EV	Kia, vhodné pro stacionární úložiště
Tržní podíl 2018 [%]	29	49	17	4	0	1

V předchozí tabulce jsou uvedeny parametry a vlastnosti bateriových článků, dle jednotlivých technologií. Jak je patrné každý typ baterie má svá pozitiva a negativa. Z tohoto důvodu je v dnešní době snaha o kombinování materiálů při výrobě bateriových článků pro dosažení komplexně kvalitních parametrů výsledné baterie. Na *grafu 10* je znázorněno porovnání energetické hustoty, resp. specifické energie jednotlivých bateriových technologií. Jak je patrné technologie **NCA** a **NMC** dosahují nejvyšších hodnot, což by odpovídalo jejich stále rostoucí popularitě a vysokému tržnímu podílu. Technologie NMC dosáhla tržního podílu 49 % v roce 2017 v oblasti EV baterií a NCA 28 %. Do budoucna se předpokládá nárůst podílu NCA, zejména z důvodu rychlého vývoje tohoto typu baterií společností TESLA a zvyšováním počtu cyklů během doby životnosti baterie v EV.

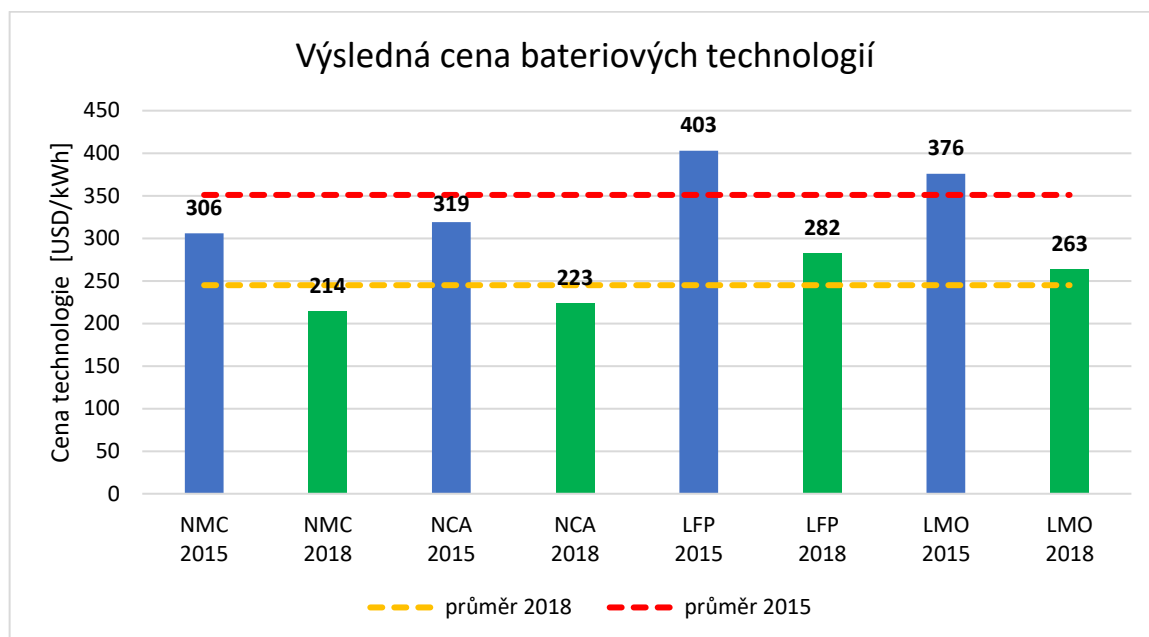


Graf 10 - Porovnání energetické hustoty bateriových technologií

3.2. Ekonomické hodnocení baterií

Pro správné ekonomické zhodnocení bateriových technologií bylo zapotřebí zjistit jejich cenu. Získání přesných údajů aktuálních cen jednotlivých typů baterií se po dlouhém pátrání jeví jako nemožné, jelikož ceny bateriových technologií prochází tzv. cost reducing a díky tomu je cena baterií nejrychleji měnící se parametr. Pro stanovení současných cen baterií jsem se rozhodl využít poznatků z publikace *Cost modeling of lithium-ion battery cells for automotive applications* [21], ve které se autoři zabývají důkladnou analýzou a modelováním výsledné ceny jednotlivých typů Lithiových baterií. Jako téměř jediná tato publikace nabízí detailnější pohled na složení výsledné ceny baterií a čím je v čase ovlivněna. Výsledná cena baterie se zjednodušeně skládá z ceny aktivního materiálu (anoda, katoda), ostatních materiálů a komponent, nákladů výroby a nákladů spojených s vývojem technologie. Pro potřeby této diplomové práce jsem se rozhodl převzít výsledné ceny baterií za rok 2015 z této vědecké publikace a převést je na současné ceny dle historických poklesů cen do roku 2018. Pokles cen baterií jsem využil

z vlastního sestaveného modelu TCO v kapitole 2.4. (viz Graf 6 - Vývoj TCO v závislosti na ceně baterií). Dle tohoto modelu cena baterií v roce 2018 dosahovala zhruba 70 % ceny baterií z roku 2015.



Graf 11 - Aktuální cena baterií dle technologie

Jak je patrné z Graf 11, technologie NMC a NCA jsou zásadně levnější než technologie LFP a LMO. Průměrná cena lithiových baterií je dle modelu v roce 2018 245 USD/kWh. Pokud by průměrná cena respektovala procentuální podíl jednotlivých technologií, na EV bateriovém trhu byla by výsledná průměrná cena 219 USD/kWh (vážený průměr cen). Samotná cena dané technologie za kWh však nemusí být plně vypovídající, jelikož do tohoto hodnocení vstupuje další zásadní parametr baterie, a to je její doba životnosti, tedy počet cyklů. Pro srovnání baterií z tohoto pohledu se podíváme, jaká je její cena vztažená na jeden cyklus.

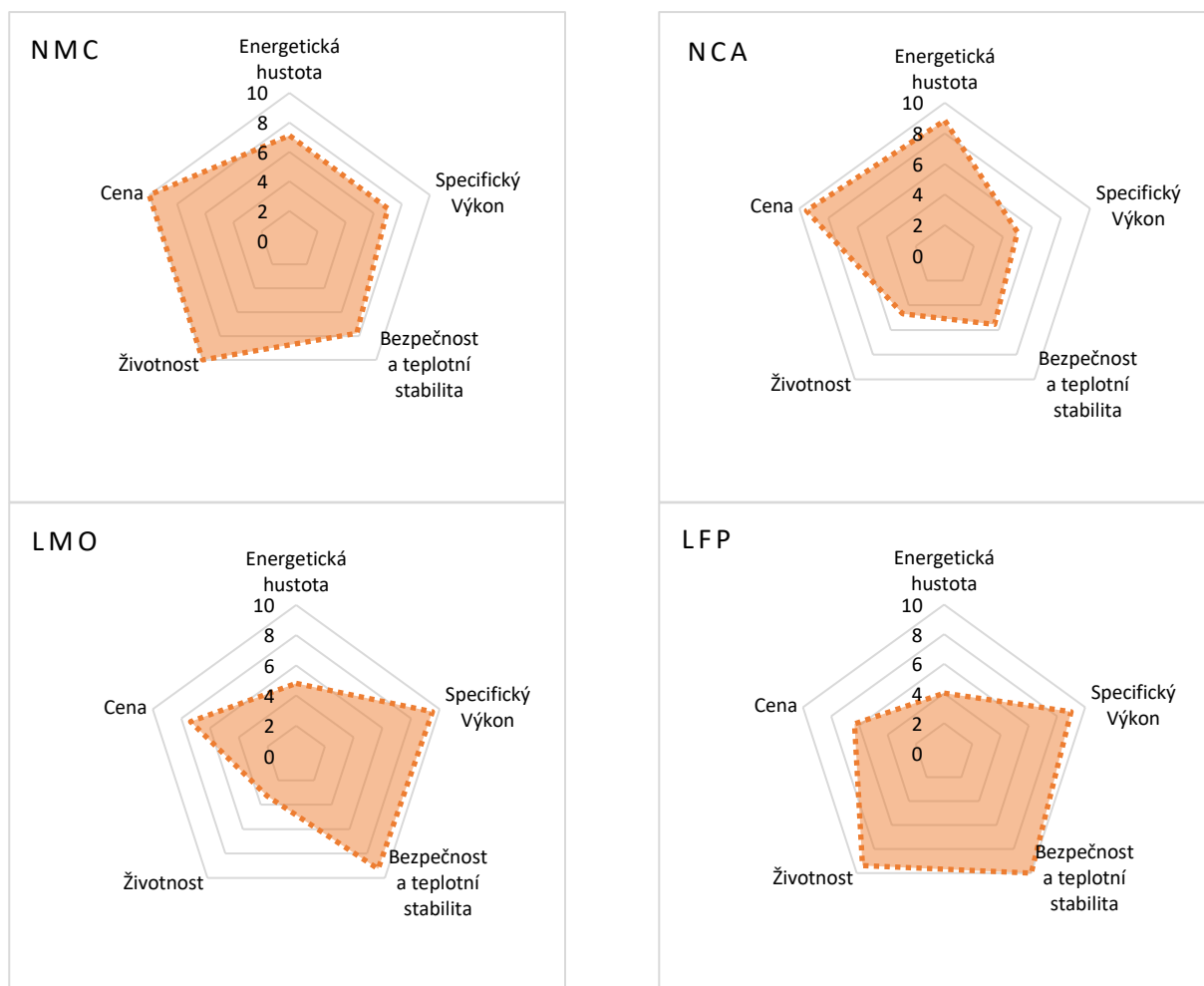
Tabulka 7 - Srovnání technologií dle ceny/kWh/cyklus

Cena/kWh dle počtu cyklů (80 % DoD) [USD/kWh/cyklus]				
Chemie katody	NCA	NMC	LFP	LMO
Min. počet cyklů	0,447	0,179	0,282	0,752
Max. počet cyklů		0,107	0,141	0,376
Průměrný počet cyklů		0,143	0,212	0,564

Z této tabulky je jasné patrné, že technologie baterií NMC je nejlevnější technologií dle ceny za cyklus. Druhou nejlevnější technologií je technologie LFP. Ta však díky své nízké energetické hustotě nedosahuje takové popularity. Naopak v současnosti populární technologie NCA je zhruba 3x dražší než technologie NMC. U technologie NCA je nutno však opět zdůraznit velice rychlý technologický pokrok. **V této kapitole jsem se rozhodl nehodnotit baterie chemie LCO a LTO, jelikož se již v oblasti elektromobility téměř nepoužívají, tudíž s nimi do budoucna pro další využití neuvažuji.**

3.3. Komplexní porovnání bateriových technologií

Pro závěrečné porovnání nejpoužívanějších bateriových technologií v oblasti elektromobility jsem zvolil parametry, které hrají v této oblasti nejdůležitější roli. Jedná se o hustotu energie, která určuje dojezd vozidla, a specifický výkon, na kterém přímo úměrně závisí zrychlení vozidla. Dalším velice důležitým parametrem je bezpečnost baterie a její teplotní stabilita. Pro úplnost ještě porovnáám cenu baterií a jejich životnost. Všechny tyto parametry baterií jsem ohodnotil stupnicí 1 až 10, kde hodnota 10 vždy značí nejlepší hodnocení daného parametru. Výsledná plocha grafu dané bateriové technologie tedy reprezentuje její všestrannost a vhodnost užití.



Graf 12 - Porovnání vlastností technologií bateriových článků

Jak je patrné baterie typu NMC a NCA jednoznačně dominují v ceně a v energetické hustotě, což jsou parametry pro využití v elektrických vozidlech stěžejní. Baterie typu LFP a LMO vynikají v bezpečnosti provozu a jejich tepelné stabilitě, díky níž dokáží také dodávat vysoké okamžité výkony. Naopak jejich energetická hustota je v porovnání s technologiemi NMC a NCA velice malá. Tyto baterie dle mého názoru naleznou největší využití ve stacionárních aplikacích, kde není tlak na minimalizaci hmotnosti, ale je zde potřeba velkých okamžitých výkonů, tedy vysokých vybíjecích proudů. Takovou stacionární aplikací může být např. podpora chodu nabíjecí stanice pro xEV s vysokými výkony.

4. Second life of batteries

Jak bylo analyzováno v kapitole 2.4. *Budoucnost elektromobilu*, v příštích několika letech nás čeká rychlý nárůst podílu elektrovozidel na trhu s osobními automobily. Tento růst trhu s elektrickými vozidly napříč Evropskými zeměmi se nevyhnutelně promítne navyšováním počtu vyřazených baterií. Tyto baterie musí být aktuálně dle evropských směrnic **End-of-Life Vehicles Directive 2000/53/EC** a **Batteries Directive 2006/66/EC** po konci životnosti (EoL⁷) shromažďovány a následně recyklovány. Po ukončení životnosti v EV však tyto baterie stále disponují zbytkovou kapacitou, která se zpravidla pohybuje mezi 70 % až 80 % původní hodnoty. **Nastává tedy otázka, zdali by vyřazené baterie se sníženou kapacitou nemohly být využity v aplikacích, kde nejsou parametry zejména pak hustota energie na kilogram váhy baterie tak kritické jako při použití v elektromobilu.** Právě tuto myšlenku dalšího využití vyřazených baterií v sobě skrývá problematika s názvem second life of batteries. [22]

Pojem second life of batteries není v současné době definován v žádných směrnicích, které se zabývají oblastí baterií či odpadů. Druhotné využití vyřazených baterií je však plně v souladu se stávajícím pohledem na hierarchií nakládání s odpady, tj. prevence vzniku odpadů, opětovné využití, recyklaci a bezpečnou likvidaci odpadů, přesně jak je stanoveno ve **Směrnici Evropského parlamentu a Rady (EU) 2018/851** ze dne 30. května 2018 a **akčním plánem Evropské komise pro oběhové hospodářství 2015**. Základní princip oběhového hospodářství je zobrazen na *obrázku 2*. Největším cílem druhotného využití baterií je prodloužení životnosti, minimalizace odpadů, zlepšení využití toků základních surovin a jejich optimalizace. V současné době se již energetické společnosti často ve spolupráci s výrobcí automobilů zaměřují na pilotní projekty, které se snaží tyto vyřazené baterie využívat v různých aplikacích. V této kapitole bude provedena analýza stavu vyřazených baterií a jejich životního cyklu.

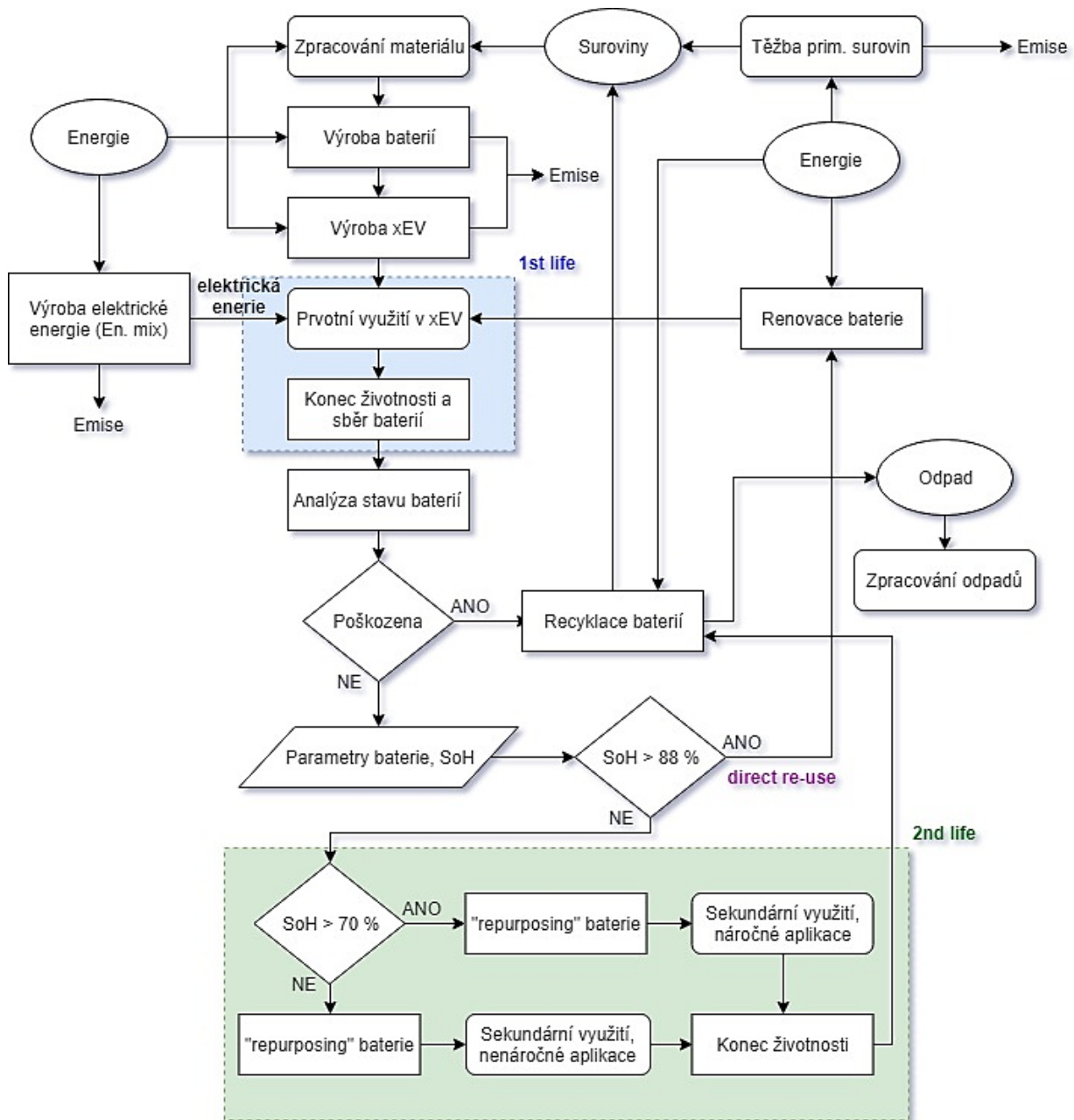


Obrázek 2 - Oběhové hospodářství a udržitelné využívání zdrojů [23]

⁷ EoL – End of the first life cycle

4.1. Výsledný životní cyklus baterie

V návaznosti na podstatu cirkulačního hospodářství a jeho myšlenku šetrného nakládání s přírodními zdroji a odpadem, jsem sestavil vývojový diagram viz *Obrázek 3*, který reprezentuje celý prodloužený životní cyklus baterií prvotně využívaných v elektromobilitě a současně zahrnující princip second life.



Obrázek 3 - Vývojový diagram životního cyklu baterií dle cirkulačního hospodářství

Je třeba si uvědomit, že tímto prodloužením životního cyklu baterií nešetříme pouze finance, materiály a primární suroviny, ale také mnoho energie, která je potřebná při výrobním procesu baterií. Prodloužením cyklu baterií a jejich dalším využitím, dojde také ke snižování produkce nebezpečných emisí. Od procesu těžby primárních surovin až po výrobu baterie vzniká zhruba 60 % všech celkových emisí, které baterie "vyprodukuje" během doby životnosti. V tabulce 8 jsou uvedeny hodnoty

spotřebované energie a vyprodukovaných emisí plynoucích z výrobního procesu baterií. [24] Z tohoto důvodu je smysluplné počet těchto výrobních procesů minimalizovat, právě např. sekundárním využitím, vhodnou recyklací či renovací baterií.

Tabulka 8 - Přehled spotřeby energie a emisí skleníkových plynů z výroby baterií dle typu

Chemie katody	Spotřeba energie při výrobě [Mj/kWh]	Celková produkce skleníkových plynů [kg CO ₂ eq./kWh]
NMC	1030	160
NCA	1010	132
LFP	970	161
LMO	810	55

Na vývojovém diagramu (obrázek 3) je modře zvýrazněna první fáze životního cyklu baterií. V tomto cyklu jsou využívány pro pohon elektrických vozidel. Ve chvíli, kdy již nejsou baterie schopny poskytovat dostatečnou energii pro pohon vozidel, jsou vyřazeny z provozu a zpravidla nahrazeny novými bateriemi. Vyřazené baterie jsou sbírány a podrobeny prvnímu testování, kdy se zjistí, zdali nejsou baterie poškozené či nejsou nebezpečné pro další využití. V případě, že se baterie či její články jeví poškozené, je baterie přímo recyklována bez dalšího využití. Projde-li baterie prvotním testováním, je převezena do továrny pro repasování baterií, ve které musí být zjištěna její „zdravotní kondice“ a hodnoty technických parametrů. Za současného stavu nelze odpovídající hodnoty parametrů vyřazených baterií získat z historie battery managementu a musí být provedena podrobná diagnostika a měření. **Výstupem tohoto měření je stanovení tzv. SoH**, tedy zmíněná „zdravotní kondice“ baterie, je to parametr, který slouží ke sledování stavu degradace bateriových článků. Toto měření je aktuálně jedním z nejnákladnějších kroků pro koncept second life od batteries. Ve zjednodušené formě je SoH běžně definován jako poměr mezi skutečnou současnou hodnotou kapacity baterie a její jmenovitou kapacitou. Komplexní SoH analýza však obsahuje údaje o aktuálním vnitřním odporu baterie, rozsahu provozního napětí článků baterie, změně samovybíjení a schopnosti přijímat a dodávat elektrickou energii. [25] Základní a zjednodušený výpočet SoH je prováděn dle následujícího vzorce:

$$SoH_t = \frac{C_t}{C_o} * 100 [\%], \quad (9)$$

kde

SoH_t	State of Health v roce t
C_t	zbytková kapacita v roce t
C_o	jmenovitá kapacita baterie.

Dosáhne-li testovaná baterie hodnoty **88 % SoH**, jsou baterie určeny pro tzv. direct re-use, což je jejich opětovné využití v totožných aplikacích jako během svého prvního životního cyklu. Baterie projdou renovací a využívají se jako náhradní či záložní baterie, kterými jsou nahrazovány poškozené baterie.

⁸ CO₂ eq. - Jednotka měřící dopad jedné tuny daného skleníkového plynu na životní prostředí ve srovnání s dopadem jedné tuny CO₂

Protože se nejedná o sekundární využití, nebudu se tímto procesem v této práci dále zabývat, ale pro komplexnost šetrného životního cyklu baterie je třeba zde tento krok uvést, jelikož se jedná o nejrychlejší způsob, jak baterie zapojit do oběhového hospodářství.

Pokud vyřazené baterie dosahují méně než 88 % a alespoň **70 % SoH**, jsou svými parametry vhodné pro využití v náročnějších sekundárních aplikacích. Tyto baterie prochází procesem, který se nazývá „repurposing“ a do českého překladu jej můžeme jen volně převést jako změna účelu baterie. Během tohoto procesu jsou bateriové systémy rozebrány na menší bateriové jednotky (battery pack, module, cell), vyčištěny a opětovně zkontrolovány. Následně jsou jednotky s podobnými parametry přidruženy, renovovány a znovu sestaveny na bateriové systémy v rozměrech, které jsou požadovány dle jejich budoucí aplikace. Takto obnovené bateriové systémy jsou dále distribuovány pro finální integraci do nových aplikací. Aplikací, v kterých mohou tyto baterie najít uplatnění, je teoreticky relativně velké množství. Mohly by být využity např. pro poskytování podpůrných služeb rozvodné sítě, krytí vlastní spotřeby, záložní bateriová úložiště, přenášení spotřeby mimo výkonové špičky sítě, podpora obnovitelných zdrojů a mnoho dalších. Je nutno zmínit, že celý tento „repurposing“ proces bude ve výsledku znamenat další náklady a bude zvyšovat výslednou hodnotu baterie pro sekundární aplikace.

Posledním možným scénářem před finálním koncem životnosti baterie je případ, v kterém její SoH dosáhne hodnoty pod 70 %. V tomto případě jsou bateriové systémy rozebrány zpravidla až na bateriové články a dále využity v menších aplikacích jako je oblast spotřební elektroniky, menších vozítek např. elektrická kola a koloběžky či nízkonáročná elektrická vozidla, jako jsou přepravní a skladovací vozíky. Tato oblast je pro komplexní pohled na výsledný životní cyklus baterií důležitá, avšak z pohledu náročnějších energetických aplikací baterií téměř zanedbatelná. Z tohoto důvodu nebude tato oblast dále zkoumána. [26]

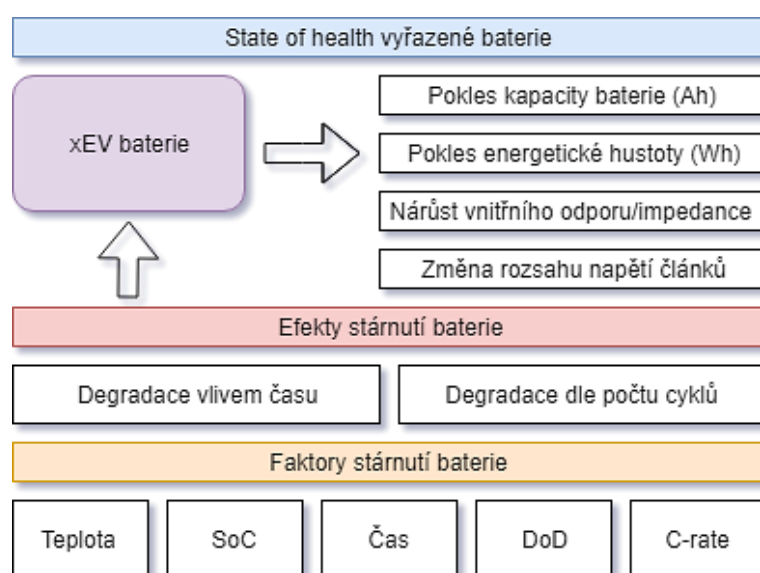
Po ukončení životnosti baterií v druhotných aplikacích jsou již baterie ve stavu, že jejich další využití by bylo ekonomicky nerentabilní a jsou proto dle legislativy EU povinně recyklovány. Procesem recyklace baterií a opětovným využitím recyklovaných surovin v nových výrobních procesech se cyklus cirkulačního hospodářství uzavře. Navzdory cenným surovinám získaných recyklací není za současného ekonomického stavu proces recyklace z důvodu jeho náročných dílčích procesů stávajících recyklačních technologií ekonomicky účinný. [27]

4.2. Proces degradace baterie

V minulé kapitole jsem poznamenal, že **stav vyřazené baterie a stanovení SoH je pro budoucí využití naprosto kritické**. Přesně z tohoto důvodu se v této podkapitole podrobněji zaměřím na proces stárnutí lithiových baterií a ověření, že z technické stránky vyřazených baterií neplyne žádné omezení pro budoucí využití v sekundárních aplikacích. Odborné poznatky v této kapitole byly identifikovány z následujících zdrojů a odborné literatury. [25] [28] [29][30] [31]

Stárnutí baterie lze dle analyzovaných dokumentů rozdělit na dva hlavní principy, a to stárnutí baterie dle počtu provedených cyklů a dle stáří baterie, tj. dle počtu let, v nichž je baterie v provozu. Každý z těchto termínů definuje jiné příčiny stárnutí baterie a změn jejich parametrů. Zjednodušeně lze tvrdit, že stárnutí baterie v návaznosti na počet cyklů je spojeno s okolnostmi při využívání elektrického vozidla, jako je např. provozní teplota baterie, vybíjecí a nabíjecí proudy, plynulost jízdy, minimální a maximální napětí bateriových článků a nabíjecí metody (využitého výkonu). Naopak stárnutí baterie a její degradace vlivem stáří baterie je spojována s okolnostmi skladování baterie, tedy při jakém SoC, teplotě a po jak dlouhou dobu je baterie nevyužívána. Stárnutí baterie se nejčastěji reprezentuje jako pokles kapacity baterie a změny vnitřního odporu / impedance baterie. Pokles kapacity baterie má efekt na budoucí ekonomický provoz sekundárních aplikací, a naopak nárůst vnitřního odporu má vliv na bezpečnost provozu aplikace, jelikož vysoké proudy protékající baterií by ji mohly nadlimitně zahřívát.

Degradace baterie je aktuálně jeden z největších problémů myšlenky druhého životního cyklu vyřazených baterií, jelikož stále neexistuje téměř žádné detailnější měření většího počtu vyřazených baterií. Z tohoto důvodu je aktuální předpověď stavu baterií po vyřazení pouze výsledkem matematických modelů, které jsou založeny na mechanismech stárnutí baterií, malého počtu měření a dat získaných během doby životnosti baterie z battery managementu. Proto je velmi důležité provedení nákladného měření a diagnostiky vyřazených baterií. Tento proces zpomaluje a zdražuje rozvoj trhu se sekundárními aplikacemi, ale je nezbytný pro dosažení bezpečnosti provozu následných bateriových aplikací. Na následujícím diagramu (obrázek 4) jsem vyobrazil základní princip degradace baterie v elektrických vozidlech, jeho hlavní příčiny a nejvíce kritické parametry, které prochází změnami během prvního životního cyklu baterie.



Obrázek 4 - Základní princip degradace baterií v xEV

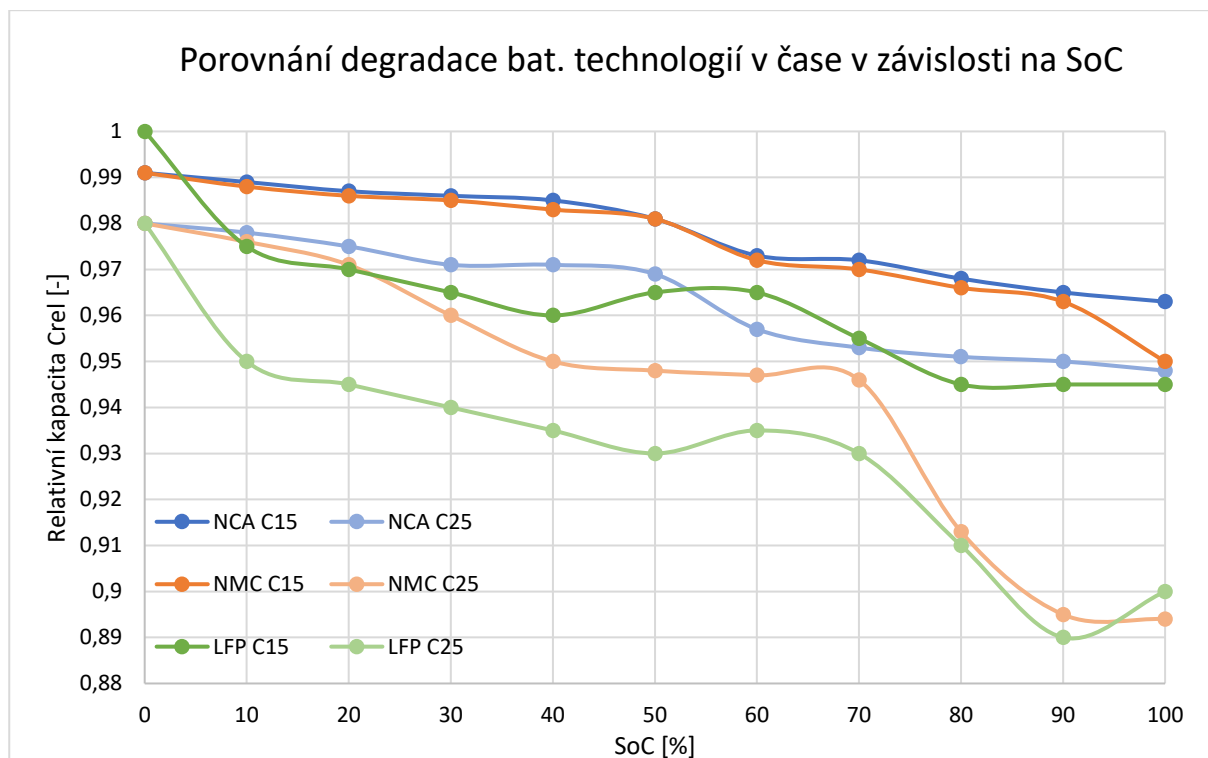
4.2.1. Degradace baterie vlivem času

Proces degradace baterie vlivem času je absolutně nezávislý na počtu vybíjecích a nabíjecích cyklů, případně na chování uživatele vozidla. Je tedy možno predikovat průběh této degradace dle chování chemie lithiových baterií v návaznosti na čas a dle menšího vzorku naměřených dat. Pro účely této práce jsem informace a data použil z odborné publikace *Calendar Aging of Lithium-Ion Batteries* [32], ve které bylo autory přímo provedeno měření parametrů baterií typů NMC, NCA a LFP v závislosti na podmínkách, při jakých byly po dobu měření skladovány. Zkušební měření bylo zaměřeno na hodnotu SoC, při které je baterie skladována, a teplotě, v jaké je baterie skladována.

Teoretické předpoklady principu chování Lithium-iontových baterií při skladování:

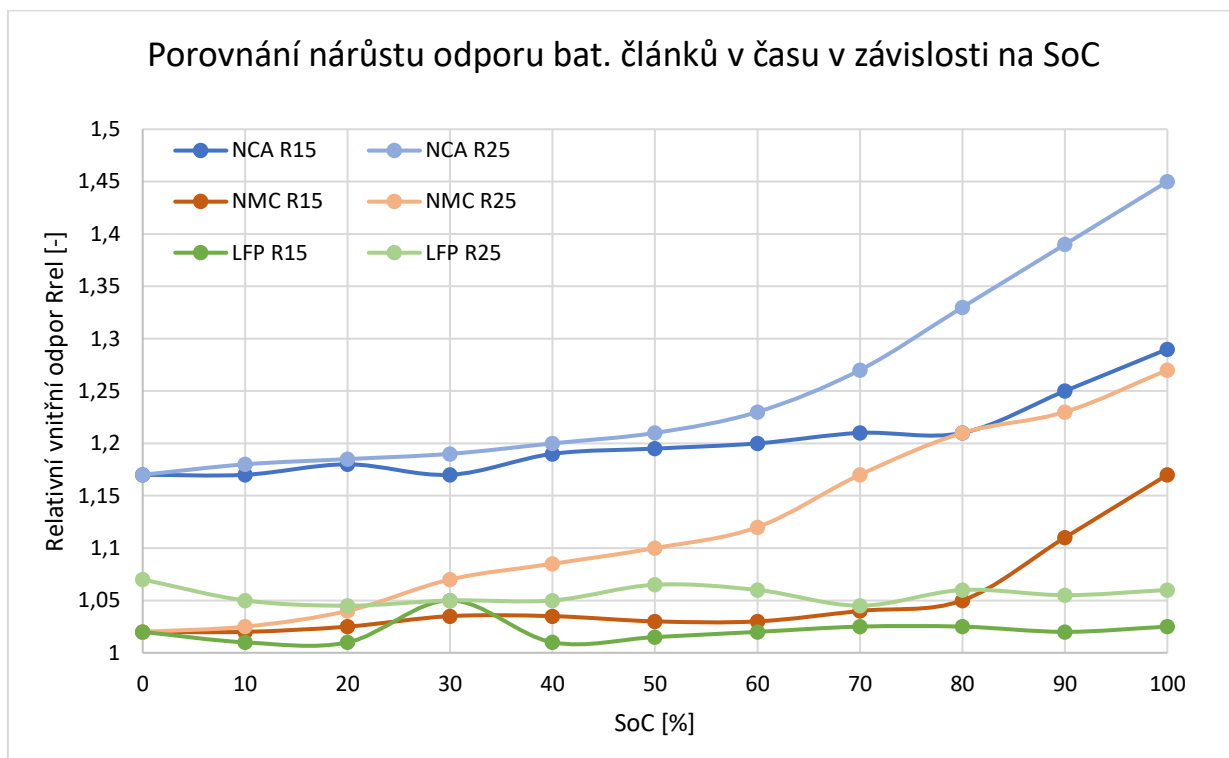
- **SoC** – State of Charge definuje úroveň aktivity uvnitř bateriového článku. Čím je vyšší hodnota SoC, tím je materiál uvnitř článku z důvodu vyšší energie aktivnější. Vyšší aktivita materiálu urychluje proces stárnutí baterie. **Při nevyužívání skladovat baterie při nižším SoC.**
- **Teplota** – čím vyšší teplota bateriového článku, tím vyšší aktivita uvnitř baterie a rychlejší degradace baterie. Nutno vzít v úvahu fakt, že při záporných teplotách baterie tzv. zamrzá, čímž narůstá vnitřní odpor baterie a rapidně klesá využitelná kapacita. Provoz baterie při nízkých teplotách opět urychluje stárnutí baterií. Ideální rozsah skladovací teploty je 5 °C až 30 °C.

Na následujícím *grafu 12* je vyobrazen proces degradace kapacity bateriových článků dle technologie (NCA, NMC a LFP). Degradace byla sledována po dobu 12 měsíců při odlišných hodnotách SoC a při dvou teplotách, a to 15 °C a 25 °C.



Graf 13 - Degradace baterií v čase

Z grafu 12 je patrné, že bateriové články typu NCA mají nejmenší pokles kapacity vlivem počtu let v provozu, a to zejména při skladování a rozsahu do 50 % SoC. Za zmínku určitě stojí, že baterie NCA jsou využívány v elektromobilech značky TESLA, která aktuálně garantuje životnost svých baterií až 500 000 ujetých km. Technologie NCA je tedy vhodná pro úložiště energie, kde nejsou kritickými požadavky vysoké výkony, ale spíše požadavek na uskladnění velkého množství energie. Naopak baterie technologie LFP v čase ztrácí svou kapacitu nejrychleji a již při skladovací teplotě 25 °C je degradace v čase markantní. Následující graf 13 znázorňuje naopak nárůst vnitřního odporu bateriových článků v čase dle technologie, teploty a hodnoty SoC při skladování opět po dobu 12 měsíců.



Graf 14 - Změna vnitřního odporu baterie v čase

Baterie technologie NCA jsou během skladování nejvíce náchylné k nárůstu vnitřního odporu. Jak již bylo analyzováno v tabulce 6 – Srovnání parametrů typů baterií, jsou baterie NCA určeny pro malé proudy a jejich tepelná odolnost je velmi nízká, s čímž se pojí i nízká bezpečnost provozu. Tento graf pouze potvrzuje již dříve analyzovaná fakta. Naopak odpor bateriových článků technologie LFP zůstává během let téměř neměnný. Tento fakt potvrzuje vhodnost těchto baterií pro budoucí aplikace s požadavkem na vysokou bezpečnost provozu, vysoký okamžitý výkon a vysoké vybíjecí proudy. Technologie NMC nabízí průměrné změny jak v kapacitě, tak ve změně vnitřního odporu.

Výsledkem tohoto zkoumání je, že v době, kdy není baterie v provozu, ať už v elektromobilu či jiné aplikaci, tak by měla být skladována při nízkých hodnotách SoC a nižších teplotách, ideálně 15 °C. Dodržením těchto parametrů bude pokles kapacity vlivem degradace baterie stárnutím dosahovat maximálně 10 % po dobu 15 let. Jelikož se průměrná roční teplota vzduchu pohybuje v ČR okolo 10 °C

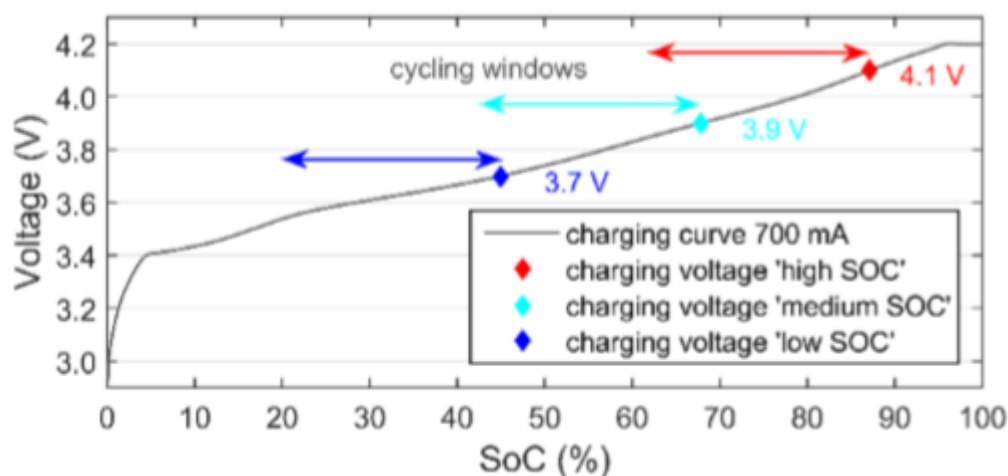
a není velká pravděpodobnost, že u většího počtu majitelů elektromobilů dojde k dlouhodobému nevyužívání vozidel, neměla by být degradace baterie vlivem stárnutí po dobu prvního životního cyklu pro další aplikace překážkou. **Předpokládám pokles vlivem stárnutí baterie v rozmezí 4 % až 7 % celkového SoH.** [31]

4.2.2. Degradace baterie v provozu

Zatěžování baterie a její následná degradace vlivem provozu elektromobilů je děj, který nelze jednoduše popsat jako předchozí proces kalendářního stárnutí. Stárnutí baterie dle provozu, tedy dle okolností a počtu cyklů, je nejvíce ovlivňováno následujícími faktory:

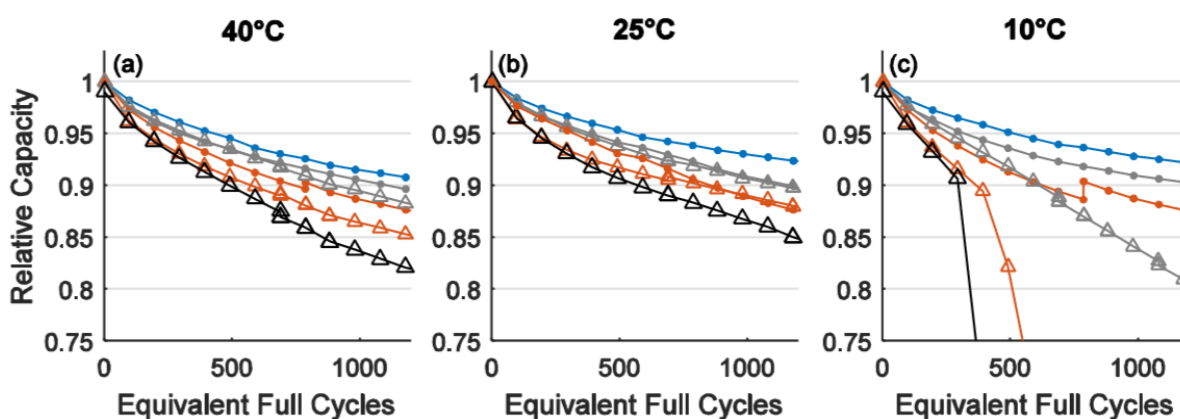
- **hloubkou vybíjení baterie v jednotlivých cyklech (DoD),**
- **teplotou,**
- **provozním napětím článků (SoC),**
- **nabíjecí a vybíjecí proudy a dynamikou jízdy.**

Absolutně největší vliv na degradaci bateriových článků je pozorován u hloubky vybíjení v jednotlivých cyklech. Degradace baterie prudce vzrůstá s hlubšími vybíjecími cykly. Je-li baterie vybíjena na 100 % DoD, její životnost je dle deklarovaných počtu cyklů při 80 % DoD zhruba čtvrtinová. Naopak při cyklování s DoD 10 % je vliv tohoto faktoru téměř zanedbatelný. U faktoru hloubky vybíjení je nutno zdůraznit skutečnost, že stejná hloubka vybíjecího cyklu např. 20 %, nemá na degradaci baterie vždy stejný vliv. Výsledný dopad DoD na degradaci baterie má také to, v jakém intervalu SoC se baterie při vybíjecím cyklu pohybujeme. **Nejoptimalnější je provoz baterie v oblasti kolem 50 % SoC**, kde je její průběh na vybíjecí charakteristice nejvíce lineární. Naopak provoz baterie při nízkých nebo vysokých SoC urychluje degradaci baterie a pokles její využitelné kapacity. Z tohoto důvodu nelze vliv DoD na bateriové články posuzovat samostatně, ale vždy v návaznosti na interval SoC. Na následujícím *grafu 14* je patrná spojitost mezi SoC a napětím článku baterií při nabíjení baterie.



Graf 15 – Nabíjecí charakteristika NCA bateriového článku [25]

Vliv hloubky dobíjení v souvislosti se SoC bateriového článku a teplotou baterie je přehledně reprezentován na grafech na *Obrázek 5*. Jelikož se nejedná již o stárnutí kalendářní, není degradace měřena v závislosti na čase, ale v závislosti na parametru známém jako Equivalent Full Cycles, zkráceně EFC. Definici EFC budu pro zjednodušení původní definice s propustností náboje definovat jako stav, kdy celková energie v několika cyklech dosáhne jmenovité hodnoty energie. Tedy pokud baterie cykluje např. při specifickém rozsahu SoC 30 % - 80 %, lze tyto dva cykly považovat za 1 EFC. Jeden EFC se rovná 1,25 cyklu s DoD 80 %, ve kterých je zpravidla udávána životnost baterií. Jeden EFC cyklus dle parametrů současných xEV v provozu, neuvažujeme-li nové modely, představuje zhruba 150 km dojezdové vzdálenosti.



Obrázek 5 - Vliv DoD na pokles kapacity baterie [31]

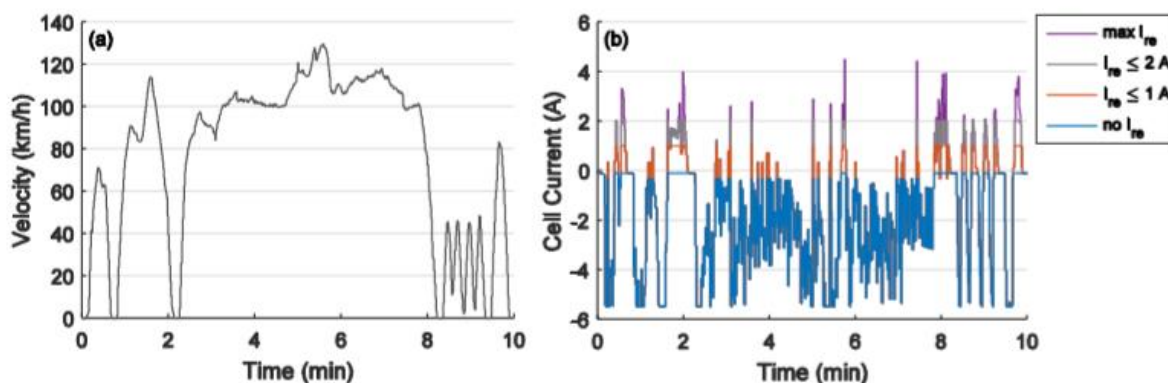
	Uc [V]	SoC	DoD [%]
—●—	3,7	low	20
—●—	3,9	medium	20
—●—	4,1	high	20
—△—	3,9	medium	41
—△—	4,1	high	41
—△—	4,1	high	61

Z těchto průběhů je patrné, že provozování baterie s cykly s nízkou hloubkou vybíjení doopravdy šetří baterie. Je také patrné, že při degradaci baterie v provozu již není nižší teplota vždy zárukou pomalejšího procesu degradace a můžeme vidět, že v některých případech již teplota 10 °C je doslova kritická.

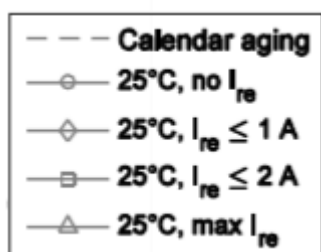
Podíváme-li se na nejhorší možný případ, a to provoz baterie při 100 % SoC, DoD 61 % a teplotě 10 °C, dokázala by nám takto zatěžovaná baterie poskytnout pouze 400 EFC před poklesem kapacity na 80 %, což se rovná přesně 500 cyklů s DoD 80 % a zhruba 60 tisíc ujetých km. Pokud by byla takováto baterie dále využívána, došlo by během několika desítek cyklů k jejímu poškození v návaznosti na strmý nárůst vnitřního odporu. Přesně pro takovéto situace je v baterii elektromobilu obsažen battery management, který vzhledem k okolnostem řídí stav nabití baterie a možnost hloubky jejího vybíjení. Proto by takovéto situace během životnosti v elektromobilech neměly nastávat. Při pohledu na průměrný pokles kapacit můžeme vidět, že před poklesem na 80 % původní kapacity všechny scénáře dodají alespoň 1200 EFC. Tomuto odpovídá zhruba 1500 cyklů s DoD 80 % a ujetá vzdálenost 180 000 km, což při pohledu do *tabulky 6 – Srovnání parametrů typů baterií*, dokonale koresponduje s počtem cyklů s DoD 80 % u baterií typu NMC a LFP, jejichž počet se pohybuje v rozmezí 1200 až 2000 cyklů. **Nebojím se tedy předpokládat, že i díky stále se zdokonalujícím se battery a thermal management systémům, nebude degradace baterie v provozu pro další využití kritickou překážkou.** Pro některé

případy sekundárních náročných aplikací bude pouze možným omezením, a to zejména vlivem ztrát výkonů (nárůst vnitřního odporu a snižování možných provozních proudů).

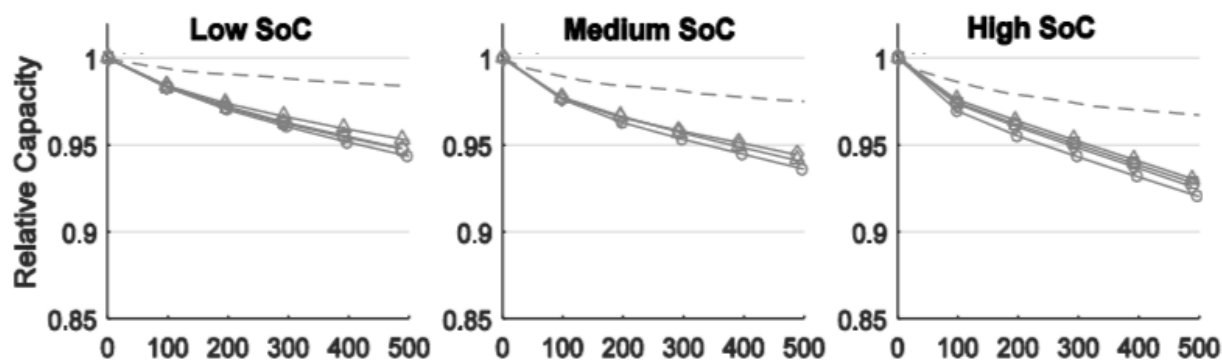
Posledním velkým problémem, který nastává během provozu elektromobilu a mohl by realizaci budoucích sekundárních aplikací z vyřazených baterií ohrozit, jsou proudy tekoucí baterií. Jedná se o proudy způsobené ať už při dobíjení baterie nebo dynamikou jízdy. Během jízdy v elektromobilu dochází totiž v baterii k velmi dynamickým změnám zatížení, které vyplývají ze zrychlení a zpomalování vozidla. Navíc během jízdy nedochází pouze k vybíjení baterie, ale také k jejímu nabíjení vlivem rekuperačního brzdění. Tento děj je čistě závislý na stylu jízdy majitele elektrovozidla. Pro popis těchto účinků vznikly jízdní profily, které popisují zatěžování baterie v provozu při jízdě v různých oblastech. Následující grafy (obrázek 6) popisují jízdní profil reprezentující jízdu na dálnici pro průměrné evropské silniční podmínky a řidiče. Na grafu vpravo jsou patrné odlišné průběhy dle omezení přijímání rekuperační energie. V případě modrého průběhu nepřijímá baterie žádnou rekuperační energii a v případě fialového naopak nemá žádné proudové omezení a přijímá veškerou energii.



Obrázek 6 - Jízdní profil zatížení EV baterie [31]



Na grafech na obrázku 7 je patrné, že **rekuperační brzdění** a vracení energie zpět do baterie, nemá negativní vliv na degradaci baterie, tudíž **nezpůsobuje pokles kapacity a pro budoucí využití vyřazených baterií není hrozbou**. Je naopak patrné, že rekuperační brzdění pozitivně působí proti degradaci baterií, a to přímo úměrně velikosti zpětného proudu, a největšího efektu snižování degradace dosahuje při vysokých SoC.



Obrázek 7 - Degradace baterií vlivem rekuperačního brzdění a profilem jízdy [31]

Kromě rekuperačního brzdění má velký vliv na baterii také proces dobíjení. V posledních letech je velký tlak na snižování celkového času dobíjení. Za účelem dosažení tohoto cíle se neustále zvyšuje výkon dobíjecích stanic, a tedy i dobíjecí proudy. Zatím však neexistuje podrobnější analýza vlivu vysokých dobíjecích proudů na bateriové články a případně jejich dřívějšího vyřazení z provozu či poškození. Obecně však platí, že využívání vyšších nabíjecích proudů, tedy vyšší než 1 C, vede k podstatně vyššímu namáhání bateriových článků, a to zejména k degradaci aktivního materiálu anody. Tento děj způsobuje relativně strmý nárůst vnitřního odporu bateriových článků a může vést až k jejímu zničení. Vysokým vybíjecím výkonům je nutno se vyhnout zejména při nízkých teplotách a vysokých hodnotách SoC. Tuto ochranou funkci mají plnit nabíjecí protokoly, které poskytují rozumný kompromis mezi dobou nabíjení a výslednou životností. I přes optimalizované nabíjecí protokoly dochází při vysokých nabíjecích proudech k urychlení degradace i při nižších SoC, a proto by neměly být využívány pro každodenní nabíjení baterií, které nejsou přímo navrženy pro vysoké nabíjecí proudy. Vliv rychlého nabíjení by však v kombinaci s vhodně nastaveným průběhem dobíjecího proudu dle optimalizovaného protokolu a battery managementu baterie v elektromobilu neměl ovlivnit parametry baterie natolik, aby nemohly být dále využívány. V případě, že budou bateriové články poškozeny, budou při kontrolním měření a analýze bateriových článků viz *Obrázek 3 - Vývojový diagram životního cyklu baterií dle cirkulačního hospodářství* vyřazeny a rovnou určeny pro recyklaci. [31]

5. Oblasti využití sekundárních baterií

V předchozích kapitolách jsem dospěl k několika důležitým poznatkům a to, že do budoucna bude počet vyřazených baterií strmě narůstat, technické parametry těchto baterií jsou vhodné i pro jiné využití než jen v oblasti elektromobility, a v neposlední řadě, že během doby prvního životního cyklu nedojde k zásadnímu poškození či degradaci. V návaznosti na tato podložená fakta se v této kapitole zaměřím na oblasti aplikací, ve kterých tyto vyřazené baterie mohou nacházet své uplatnění a jaká je vůbec motivace a snaha k jejich zařazování do chodu ES ČR.

5.1. Motivace využívání bateriových systémů

V průběhu posledních několika let dochází k masivní proměně celého energetického odvětví. Tato proměna je způsobena zejména “dožíváním“ konvenčních energetických zdrojů, zpřísnováním emisních limitů pro jejich provoz. V tomto případě se nejedná pouze o snižování emisí CO₂, ale také o emise těžkých kovů, jako je například rtuť, která se uvolňuje ve formě sloučenin a následně se váže na tuhé částice malých průměrů (PM_x) a je schopna dálkového atmosférického přenosu. V návaznosti na tento jev dochází ke spadu rtuti i v odlehlých oblastech od místa výroby. Právě Česká republika má jedno z nejvyšších hodnot znečišťujících látek s obsahem rtuti v ovzduší. Touto problematikou se zabývá dokument LCP BREF BAT, který stanovuje nově limity emisí rtuti pro velká spalovací zařízení s tepelným příkonem nad 50 MW, a to bez ohledu na to, v jakém režimu jsou provozovány. To znamená

bez výjimek pro spalovací zařízení, která jsou provozována <1500 h/r a <500 h/r. Další snahou EU je omezování provozu jaderných elektráren, typickým příkladem jsou země jako Německo a Rakousko. V návaznosti na tyto skutečnosti dochází k velkému nárůstu využívání obnovitelných a decentrálních zdrojů elektrické energie, a to téměř na všech napěťových úrovních elektrizační soustavy od velkých fotovoltaických a větrných elektráren s instalovaným výkonem v řádech desítek a jednotek MW až po tzv. mikro zdroje s instalovaným výkonem menším než 10kW. Proces odklonu od centrální energetiky a nárůst počtu intermitentních zdrojů s sebou přináší zhoršující se čitelnost a schopnost předpovídat výrobu a spotřebu jednotlivých subjektů a s přihlédnutím na značnou závislost obnovitelných zdrojů na výkyvech počasí se dostáváme do situace, která může velmi negativně ovlivnit fungování přenosové a distribuční soustavy a jejich dispečerského řízení. Dalším negativním faktorem ovlivňující bezproblémový chod a udržování rovnováhy v ES v České republice se v blízké budoucnosti stane vysoký počet elektromobilů, který je hrozbou zejména z důvodu nárazových špičkových odběrů. Ve zkratce mohu konstatovat, že **do budoucna bude stále narůstat nejistota a určitá entropie celkového chování ES a nastanou problémy zejména z pohledu optimálního plánování výroby, nasazování podpůrných služeb, udržení stability a kvalitativních parametrů elektrické energií v síti.** V následující *tabulce 9* jsem znázornil základní stacionární aplikace BESS, v kterých budou instalovány vyřazené baterie a které budou stále častěji nacházet využití v ES ČR. K jednotlivým aplikacím jsem také přiřadil nejpravděpodobnější subjekty, které budou danou oblast aplikace BESS využívat. Není však podmínkou, že by jiné subjekty, které nejsou v *tabulce 9* uvedeny, nemohly tyto aplikace využít.

Tabulka 9 - Oblasti aplikací BESS vyřazených baterií

Oblasti aplikace BESS	Subjekty	Komentář
Bateriová úložiště pro OZE	Vlastníci nemovitostí s OZE (zákazníci)	Zvyšování efektivity provozu OZE a jejich vlastní spotřeby
Omezování energetických špiček (Peak shaving)	Obchodní a průmyslové podniky (zákazníci), Provozovatelé PS a DS	Snižování spotřeby ve špičce, zvyšování kapacity bez velkých investic T&D
Bateriová úložiště a bateriové farmy	Výrobci elektřiny, obchodníci s elektřinou	Ukládání přebytků energie, obchodování s elektřinou
Zvyšování stability sítě a její regulace	Provozovatelé PS a DS, poskytovatelé PpS	Regulace f,U,Q a udržování výkonové bilance v ES
Nabíjení xEV	Provozovatelé dobíjecích stanic EV	Snižování nárazového zatížení ES v čase nabíjení EV
Záložní zdroje (Back up)	Obchodní a průmyslové podniky, vlastníci nemovitostí	Záložní zdroje v případě výpadky dodávky el. energie ze sítě
Ostrovni provoz	Obchodní a průmyslové podniky, vlastníci nemovitostí	Provoz v místech bez odběrového místa či výpadku dodávky
Start ze tmy (Black start)	Výrobci elektřiny	Náhrada záložních zdrojů ve formě diesel agregátů, obnovování chodu ES

Právě v těchto zmíněných oblastech aplikací, které se do budoucna pokusí čelit negativním jevům aktuálního rozvoje energetiky a omezit jejich dopady na fungování ES, budou nalézat využití čím dál

častěji aplikace z vyřazených baterií z elektrických vozidel. Jejich hlavním účelem bude posílení výkonu a flexibilitu zdrojů, které poskytují podpůrné služby a přenášení výkonu v průběhu dne během časů výkonových špiček v soustavě. Nebojím se tvrdit, že se tyto bateriové systémy díky své vysoké spolehlivosti a nenáročnosti provozu stanou jedním ze základních stavebních kamenů novodobé energetiky a umožní efektivnější integraci velkého množství intermitentních zdrojů.

V následujících kapitolách se podrobněji zaměřím na vybrané aplikace, které dle mého názoru budou v budoucnu nejčastěji využívány a budou pro budoucí optimální provoz ES v České republice nepostradatelné. [20]

5.2. BESS jako možný poskytovatel podpůrných služeb sítě

Jak jsem již zmínil v předchozí kapitole, budou bateriové systémy potřeba z důvodu stále vyšší nutnosti stabilizace výkyvů v ES. Jelikož je stabilní a bezpečný chod ES nadřazen všem ostatním aktivitám v ES, bude dle mého názoru nejperspektivnější oblastí využití bateriových úložišť právě podpora a stabilizace chodu ES České republiky, a proto se na tuto oblast v následujících částech práce zaměřím nejpodrobněji. Tento nadcházející stav bude znamenat, že se velkokapacitní baterie budou muset zúčastňovat trhu s podpůrnými službami a stanou se tak jejich poskytovateli. Za aktuální situace tuto stabilitu stále zajišťuje systém podpůrných služeb zajišťovaný konvenčními zdroji, zpravidla skrze točivé zdroje. Pro bližší náhled na to, jaké podpůrné služby by mohly do budoucna bateriové systémy reálně poskytovat a jaký je jejich význam, provedu analýzu jednotlivých podpůrných služeb dle aktualizovaného kodexu ČEPS ze dne 1.4.2019 a požadavků na jejich poskytování.

5.2.1. Podpůrné služby sítě a jejich význam

Pro co nejlepší pochopení funkce a jednoznačnost podpůrných služeb je nejprve nutné definovat k čemu vlastně slouží. Společnost ČEPS jako provozovatel přenosové soustavy a držitel licence odpovídá za bezpečný a spolehlivý provoz PS, kvalitu přenosu elektrické energie a k zajištění požadavků pro provoz ES ČR, jenž vyplývají z mezinárodní spolupráce v rámci ENTSO-E. K naplnění tohoto cíle využívá ČEPS tzv. Systémových služeb pro elektrizační soustavu na úrovni PS dle Energetického zákona. [33] Provozovatel PS zajišťuje následující čtyři systémové služby s využitím uvedených technickoorganizačních prostředků pro každou uvedenou službu:

1.) Udržování kvality elektrické energie:

- udržování souhrnné výkonové zálohy pro primární regulaci frekvence,
- sekundární regulace f a P,
- sekundární regulaci napětí,
- terciární regulace napětí,
- zajištění kvality napěťové sinusovky,
- zajištění stability přenosu.

2.) Udržování výkonové rovnováhy v reálném čase:

- sekundární regulace f a P,
- terciární regulaci výkonu,
- využití dispečerské zálohy.

3.) Obnovení provozu:

- plán obnovy,
- start ze tmy a schopnost ostrovního provozu.

4.) Dispečerské řízení:

- tato služba zahrnuje veškeré výše uvedené a dále také
 - zajištění bezpečnosti provozu prostřednictvím plánu obrany a provozních instrukcí,
 - řízení propustnosti sítě (toků činných výkonů) pomocí zapojení sítě, redispečinku a protiobchodu.

Právě pro zajištění výše uvedených systémových služeb (SyS) jsou využívány podpůrné služby sítě (PpS). V návaznosti na tyto SyS jsou podpůrné služby také jednou z možných variant obstarání potřebné regulační energie (RE), pomocí které se vyrovnává tzv. Systémová odchylka (SyO). ČEPS dále využívá pro pokrytí služby „Udržování výkonové rovnováhy v reálném čase“ regulační energii opatřenou na domácím vyrovnávacím trhu (VT) či RE nakoupené ze zahraničí (EregZ). Tyto podpůrné služby sítě jsou definovány společností ČEPS a.s. jako: „činnosti fyzických nebo právnických osob pro zajištění provozování elektrizační soustavy a pro zajištění kvality a spolehlivosti dodávky elektřiny“ [33]. Firma ČEPS zajišťuje požadované objemy PpS prostřednictvím tzv. výběrových řízení, vyrovnávacího trhu či přímou smlouvou s dodavatelem PpS. Od 1. dubna 2019 došlo v návaznosti na evropské nařízení **The System Operation Guideline (SOGL)** a **Electricity Balancing Guideline (EBGL)** k přejmenování využívaných podpůrných služeb k dosažení přehlednějšího využívání na úrovních propojených ES jednotlivých zemí EU. Aktuálně se podpůrné služby dělí na:

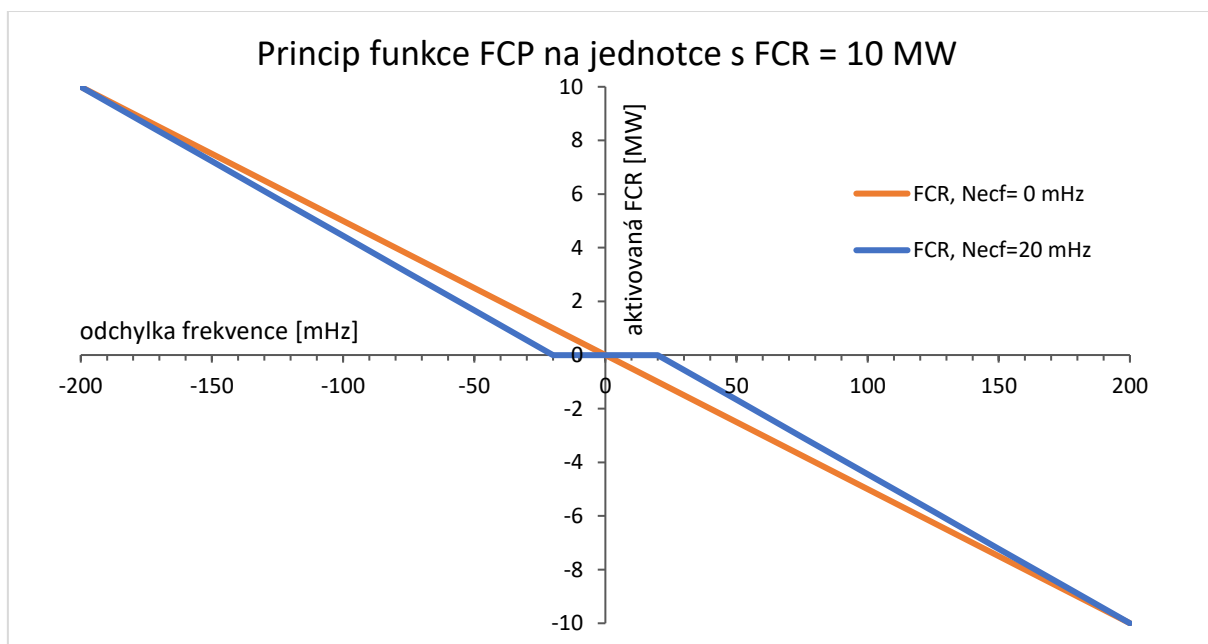
- **Služby výkonové rovnováhy tzv. SVR, které se používají k zajištění rovnováhy mezi výrobou a spotřebou.** Do této kategorie spadají následující PpS:

1. Proces automatické regulace frekvence (FCP), dříve jako Primární regulace (PR) – dle kodexu ČEPS je tato SVR definována následovně: „*Proces automatické regulace frekvence je lokální automatická funkce zajišťovaná obvody automatické regulace frekvence, spočívající v přesně definované změně výkonu elektrárenského bloku v závislosti na odchylce frekvence od zadané hodnoty.*“ [34] Tento automatický proces regulace je řízen pomocí regulátoru, který je řízen níže uvedenou rovnicí, která udává, jaká část rezervovaného výkonu je při změně f uvolněna.

$$\Delta P = -\frac{100}{S} \times \frac{P_N}{f_N} \times \Delta f, \quad (10)$$

kde	ΔP	požadovaná změna výkonu [MW]
	P_N	nominální výkon jednotky [MW]
	Δf	odchylka frekvence od zadané hodnoty [Hz]
	S	statika neboli krok citlivosti nastavení P [%]
	f_N	zadaná frekvence, obvykle 50 Hz [Hz].

Maximální rezervovaná velikost zálohy pro automatickou regulaci frekvence, dále jen FCR, na jedné jednotce je uvolněna při změně kmitočtu v soustavě o 200 mHz od zadané hodnoty, v České republice tedy od 50 Hz. Tento požadavek vychází z pravidel ENTSO-E, dle níž nesmí odchylka frekvence v propojené ES překročit hodnotu ± 200 mHz, v případě výpadku výroby či spotřeby až do výše **3000 MW**. V návaznosti na tato pravidla je poskytovatel podpůrné služby FCP povinen uvolnit svůj poskytovaný rezervovaný výkon ve výši 100 % do 30 sekund od času vzniku odchylky frekvence a do 15 sekund je povinen uvolnit 50 % poskytovaného rezervovaného výkonu. [34] Celková hodnota výsledné velikosti FCR v synchronně propojené soustavě je rozdělena mezi jednotlivé subjekty poskytující FCP dle regulační oblasti ES, v níž se nachází. Tyto jednotlivé regulační oblasti jsou charakterizovány součtem jejich čisté spotřeby a výroby. Celková FCR je tedy rozdělena mezi více jednotek a pro co největší omezení výpadků jednotlivých jednotek bylo stanoveno pravidlo, že FCR na jednu jednotku se může pohybovat pouze v intervalu od 3 MW do 10 MW. Tyto zmíněné kroky reprezentují snahu provozovatele PS o co nejlepší zajištění bezpečnosti provozu ES, rozložení FCR mezi více spolupracujících energetických zařízení a rovnoměrné pokrývání ES na celém území ČR službou FCP. Při poskytování služby FCP dále existuje tzv. princip solidarity, jenž znamená to, že při narušení rovnováhy v ES se na jejím opětovném nastolení podílejí všechny zdroje, které jsou do FCP v ES zapojeny. Na následujícím *grafu 15* jsem vynesl statickou charakteristiku obvodů korektury frekvence na jedné jednotce poskytující FCP, která disponuje maximální rezervovanou zálohou výkonu 10 MW. Pro porovnání jsou vyneseny statické charakteristiky, a to jak pro regulaci bez aktivovaného pásma necitlivosti, tedy **Necf = 0 mHz**, tak pro regulaci s nastaveným pásmem necitlivosti korektoru frekvence **Necf = 20 mHz**. Takto nastavená regulace, nebude reagovat na odchylku frekvence v síti v intervalu od 49,98 Hz do 50,02 Hz.



Graf 16 - Statická charakteristika korektury frekvence jednotky FCP

Ojedinělým pravidlem pro službu FCP je to, že se **regulační energie v rámci poskytování FCR nevyhodnocuje**. Toto pravidlo vychází z charakteru této služby, jelikož její poskytovaný výkon se mění v čase v závislosti na změně frekvence v síti, tudíž jakýmsi způsobem osciluje kolem nulového výkonu. Aktuálně je v roce 2019 pro potřeby FCP v ES České republiky vyhrazena celková velikost FCR ve výši **81 MW**. [35]

2. Automaticky ovládaný proces obnovení frekvence a výkonové rovnováhy (aFRP), dříve jako Sekundární regulace (SR) – dle kodexu ČEPS je tato SVR definována jako: „*Automaticky ovládaný proces obnovení frekvence a výkonové rovnováhy realizovaný prostřednictvím změny hodnoty výkonu regulované jednotky, tak jak je požadováno regulátorem frekvence, a salda předávaných výkonů. Zálohou se rozumí požadovaná změna výkonu, kladná nebo záporná, na svorkách poskytující jednotky.*“ [34] Poskytovatel aFRP je dle kodexu ČEPS povinen poskytnout velikost aFRP+ či aFRP- své jednotky určenou rychlostí změny výkonu nejpozději 10 minut od vzniku požadavku. Minimální určená rychlost změny výkonu jednotky pro poskytování aFRP je stanovena na **2 MW/min**. Pro dostatečné pokrytí služby aFRP jsou stanoveny limity pro velikost poskytované regulační zálohy aFRR+ a aFRR-. Minimální poskytovaná záloha na jedné jednotce je 10 MW a maximální velikost zálohy je 70 MW.

3. Ručně ovládaný proces obnovení frekvence a výkonové rovnováhy mFRPt, dříve jako Minutové zálohy (MZt) – dle kodexu ČEPS je tato SVR definována jako: „*Ručně ovládaný proces obnovení frekvence a výkonové rovnováhy realizován poskytnutím sjednané regulační zálohy mFRRt+ nebo mFRRt- jednotkou do t minut od příkazu dispečinku ČEPS. Zálohou se rozumí požadovaná změna výkonu, kladná nebo záporná, na svorkách poskytujícího zařízení.*“ [34] Tyto uvedené služby výkonové rovnováhy lze poskytovat ve dvou možných časech, a to v čase $t = 5$ minut a $t = 15$ minut. V případě služby **mFRP₅** je minimální velikost regulační zálohy na jedné jednotce stanovena na hodnotu **30 MW** a minimální doba poskytování (aktivace) této zálohy jsou 4 hodiny. V případě služby **mFRP₁₅** je minimální velikost regulační zálohy stanovena na hodnotu **10 MW** a maximální velikost regulační zálohy na **70 MW**. V tomto případě není doba aktivace omezena.

4. Proces náhrady záloh RRP – dle kodexu ČEPS je tato SVR definována jako: „*RRP je proces náhrady záloh, realizovaný poskytnutím sjednané regulační zálohy RR+ nebo RR- jednotkou do 30 minut od příkazu dispečinku ČEPS. Zálohou se rozumí požadovaná změna výkonu, kladná nebo záporná, na svorkách poskytujícího zařízení.*“ [34] Časy aktivace RRP jsou pouze násobky pevné čtvrt hodiny ležící v intervalu od 15 minut do 60 minut. Minimální velikost regulační zálohy RR na jedné jednotce je 10 MW a maximální velikost 70 MW.

- **Ostatní podpůrné služby tzv. Nefrekvenční služby, jenž se využívají k zajištění kvality napětí a provozu PS.** Do této kategorie spadají následující SVR:

1. Snížení výkonu SV30 - dle kodexu ČEPS je tato SVR definována jako: „*služba na blocích, které jsou do 30 min od pokynu dispečinku ČEPS schopny snížení výkonu o předem sjednanou hodnotu zálohy (RZSV30) nebo jsou schopny plného odstavení nebo nenajetí zdroje uvedeného v PP*“ [34] Tato služba je využívána zejména pro snižování dodávek elektrické energie do ES a k případné regulaci nerovnováhy při záporné odchylce v soustavě, která přesahuje standartní regulační rozsah předešlých SVR- (aFPR-, mFPR-, RRP). **Minimální velikost** poskytované zálohy od jednoho poskytovatele SV30 je **30 MW**. **Od roku 2020 již nebude službu možno dále poskytovat.**

2. Sekundární regulace U/Q (SRUQ) – tato SVR je automatickou funkcí, jenž slouží k udržení zadané velikosti napětí v pilotních uzlech ES. Pro tuto činnost využívá celý smluvně dohodnutý regulační rozsah jalového výkonu energetického zařízení. Hlavní kritéria kladená na energetický zdroj poskytovatele automatické sekundární regulace U/Q jsou regulační rozsah Q, dostupnost a lokalita zdroje. Dostupnost představuje dobu, po kterou je generátor schopen regulovat v rámci SRUQ při využití celého smluvně dohodnutého regulačního rozsahu. [34]

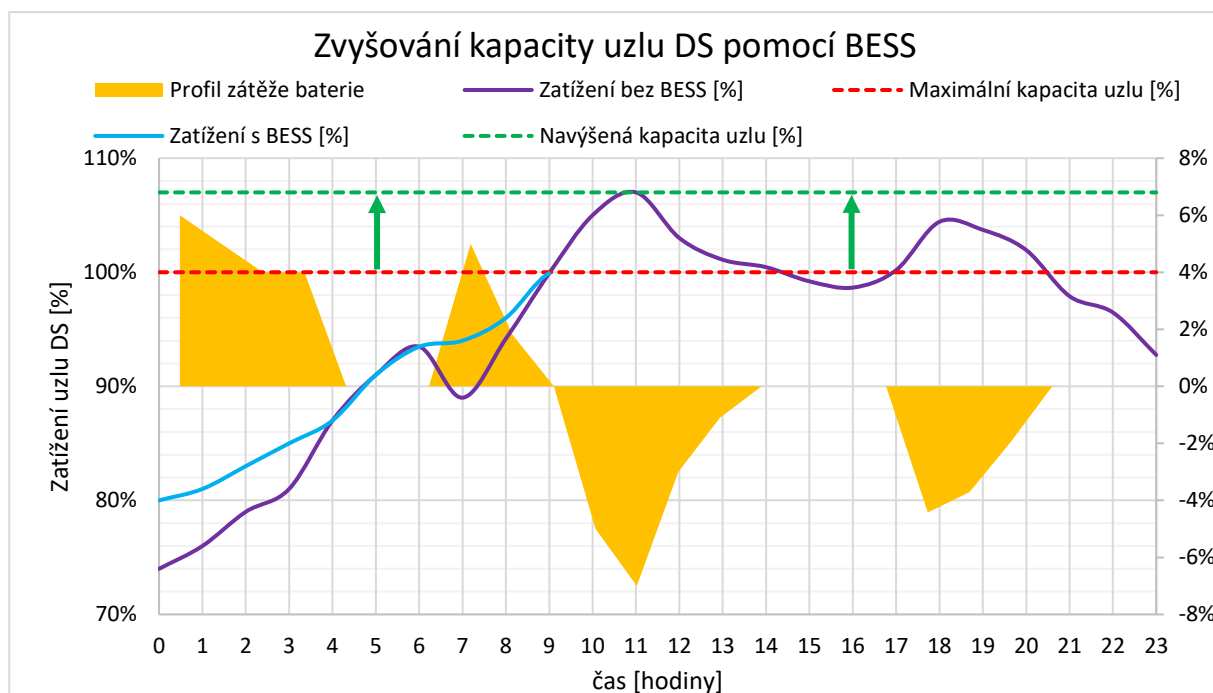
3. Schopnost ostrovního provozu OP – tato SVR je nezbytná pro předcházení a řešení stavů nouze v ES. Schopnost ostrovního provozu je definována obecně jako: „*schopnost provozu bloku do vydělené části vnější sítě tzv. ostrova*“ [34]. Schopnost ostrovního provozu je doprovázena vysokými nároky na regulační schopnosti bloku, jenž tuto službu poskytuje, a to zejména na systémové veličiny napětí a frekvence. Blok poskytující OP automaticky přechází do ostrovního režimu v případě, že frekvence v ES klesne pod 49,8 Hz nebo vzroste nad hodnotu 50,2 Hz.

4. Schopnost startu ze tmy (BS) – tato služba je definována jako schopnost bloku najetí na jmenovité otáčky a dosažení jmenovitého napětí bez podpory vnějšího zdroje napětí a následné připojení k síti a jejího napájení ve výše definovaném ostrovním režimu. Tato SVR je kritickou pro obnovování dodávky po úplném nebo částečném rozpadu sítě.

V této podkapitole jsem pro přehled uvedl, jaké služby udržování výkonové rovnováhy sítě existují, tudíž v jakých oblastech by se mohla bateriová vysokokapacitní úložiště při podpoře chodu ES uplatnit. S myšlenkou využívání velkokapacitních bateriových úložišť jako poskytovatele SVR, a tudíž přispívání ke stabilnímu chodu PS, se absolutně ztotožňuji. Celkově jsem toho názoru, že **potenciál akumulace je do budoucna v oblasti moderní decentralizace energetiky obrovský**. Nelze však bez podrobnější analýzy tvrdit, že lze bateriové systémy plošně využít ve všech výše uvedených oblastech PpS za aktuální situace v České republice. Jejím většímu rozvoji stojí v současnosti v cestě hned několik překážek. Právě na analýzu těchto překážek a jejich možná řešení se zaměřím v kapitole 6. *Současné překážky v rozvoji akumulace v ČR.*

5.3. BESS umístěné v uzlu DS

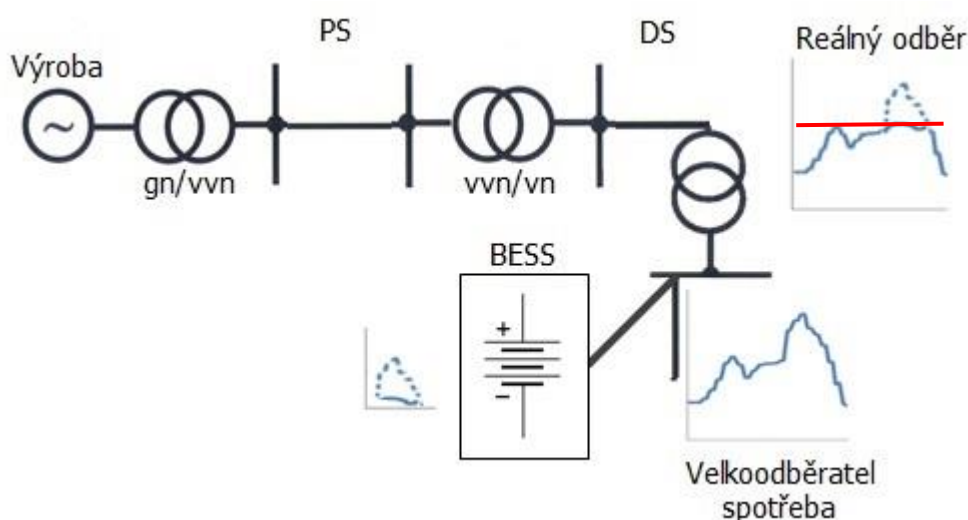
Bateriové systémy poskytují vysoký výkon a krátkém čase, a proto jsou ideální pro využívání ke snižování zatížení v čase špičkového zatížení ES ČR tedy v časech tzv. Peak Loadu, který trvá od 8:00 do 20:00. Tato aplikace může být využita jak koncovými zákazníky, tak provozovateli PS a DS. Jelikož stále roste celkové zatížení PS a DS a současně nedochází k úměrnému rozvoji a obnově infrastruktury elektrizační soustavy, tak vzhledem k tomuto nárůstu zatížení může docházet v časech odběrových špiček k přetěžování některých uzlů PS či DS. Tento stav přetížení nastává z důvodu, že stávající přenosové kapacity již operují na úrovni svých jmenovitých hodnot a nedokáží již pokrývat další nárůst zatížení. Modernizace elektrizační soustavy je velice nákladný a zdoluhavý proces, kterému by se mohli provozovatelé PS a DS vyhnout právě využíváním BESS v místech rozveden nejvíce přetěžovaných uzlů. Na tuto aplikaci bychom mohli nahlížet také jako na reálnou opci na investici do nové výstavby jak už vedení či stanic DS. V tomto případě by využití BESS fungovaly na podobném principu jako přečerpávací elektrárny a to tak, že v čase nízkého zatížení by docházelo k jejich nabíjení a v časech špičkového zatížení daného uzlu DS by baterie poskytovaly potřebnou elektrickou energii nad rámec jmenovité kapacity uzlu. V anglické terminologii nazýváme tento proces tzv. **Load shifting** neboli přesouvání výkonu/zatížení. Touto aplikací BESS dojde k realizaci tzv. odložené investice do modernizace ES. Na základě této teoretické myšlenky jsem sestrojil následující graf, který je založen na reálném průběhu zatížení ze dne 3. května 2019 v PS v ČR. Pro přehlednost je v grafu vyneseno i průběh profilu zátěže využívaného bateriového úložiště v poměrném výkonu vztaženém k maximální kapacitě uzlu v %. Kladné hodnoty profilu zátěže baterie reprezentují proces jejího nabíjení a záporné hodnoty naopak čas, ve kterém je baterie vybíjena, a tedy kdy energii do uzlu dodává.



Graf 17 - Zvyšování maximální přenosové kapacity uzlu DS

Jak je patrné z předešlého *grafu 16* a zejména z profilu zátěže bateriového systému, dochází opravdu vhodným vybíjením a nabíjením umístěného velkokapacitního akumulátoru v uzlu k navýšení jmenovité kapacity DS v dané lokalitě. Je nutno zdůraznit, že v tomto případě by bylo BESS umístěno na straně dodávky, tedy na straně PDS. Pokud by v budoucnu došlo k rozvoji takovýchto bateriových systémů, jednalo by se o úložiště o vysokých kapacitách a vysokých vybíjecích výkonech, řádově i desítky MW. Za současné situace by byla realizace takovéto akumulace jak technicky, tak ekonomicky velice náročná.

Velmi podobným způsobem mohou takové BESS využít i odběratelé většího objemu elektrické energie, tedy i vysokých odběrových výkonů, zejména průmyslové a výrobní podniky. Tyto subjekty by tato úložiště mohla využít zejména pro omezování odběrových špiček a využívat je pro lepší rozložení průběhu denního diagramu spotřeby elektrické energie, které by vyústilo v omezení odběrů elektrické energie v časech špičkového zatížení. Tímto postupem mohou tyto zákazníci předejít sankcím za **překračování čtvrt hodinového maxima**, což je maximální hodnota elektrického výkonu, kterou může oprávněný zákazník odebrat v daném odběrném místě od provozovatele distribuční soustavy. Těmito kroky mohou tyto zákazníci docílit snížení nejvyšší hodnoty potřebného výkonu odebrané elektrické energie a tím i **snížení rezervovaného příkonu**, což se projeví ve snížení nákladů za odebranou elektrickou energii. Další výhodou plynoucí pro odběratele z pořízení BESS je možnost využívání elektrické energie z časů nižších cen odebrané elektrické energie v časech vyšších cen elektrické energie. Tuto funkci bateriových úložišť dle aktuálního rozdílu cen elektrické energie v době Peak Loadu a v době Off Peaku vzhledem k vysokým počátečním investicím na pořízení těchto systémů, hodnotím momentálně za ekonomicky nerentabilní. Pro přiblížení funkčnosti této aplikace jsem sestavil následující schéma elektrizační soustavy s uzlem v DS, do kterého je připojen velkoodběratel elektrické energie disponující BESS pro aktivní omezování odběrových špiček. [36]



Obrázek 8 - Využití BESS pro omezování odběrových špiček na straně velkoodběratele

Na *Obrázek 8* je znázorněno schéma části ES, kde velkoodběratel elektrické energie z DS vlastní BESS, kterou využívá pro omezování odběrů v době špičkového zatížení ES. Tuto spotřebu mu v časech špičkových zatížení pokrývá elektrická energie dodávaná z bateriového úložiště. Je patrné, že jeho celkový odběrový diagram po zapojení BESS je bez výrazné špičky zatížení v odpoledních hodinách, tudíž tento podnik nezatěžuje nadměrně odběrové místo v DS. Výpočet optimální kapacity použitého BESS pro omezení špičkového odběru můžeme zjednodušeně vypočítat dle následující rovnice:

$$\text{Energetická hustota BESS} = \int_0^t \Delta P(t) dt [Wh], \quad (11)$$

kde ΔP Energetická hustota BESS potřebná minimální kapacita bateriového systému [Wh]
nadlimitní výkon v čase špičkového zatížení ES.

Další žádanou funkcí zlepšující chod ES takto zapojené BESS na straně odběratele je možnost jejího využití ke kompenzaci jalového výkonu. Povinností každého odběratele je udržovat účinník v tzv. neutrálním pásmu, což je pásmo v rozmezí $\cos \varphi = 0,95$ až $\cos \varphi = 1$. Každý odběratel by měl tedy alespoň částečně kompenzovat svůj zdánlivý výkon, vzniká-li v místě jeho odběru induktivní jalový výkon jeho činností. Nedodrží-li odběratel účinník ve stanoveném pásmu, je mu naúčtována dodatečná platba za nedodržení hodnot účinníku v místě jeho odběru. Díky optimální nebo i částečné kompenzaci jalového výkonu dochází ke snížení zatížení a úbytků na vedení v důsledku zmenšení proudové zátěže. Výsledný kompenzační výkon dané BESS baterie lze určit dle následující rovnice:

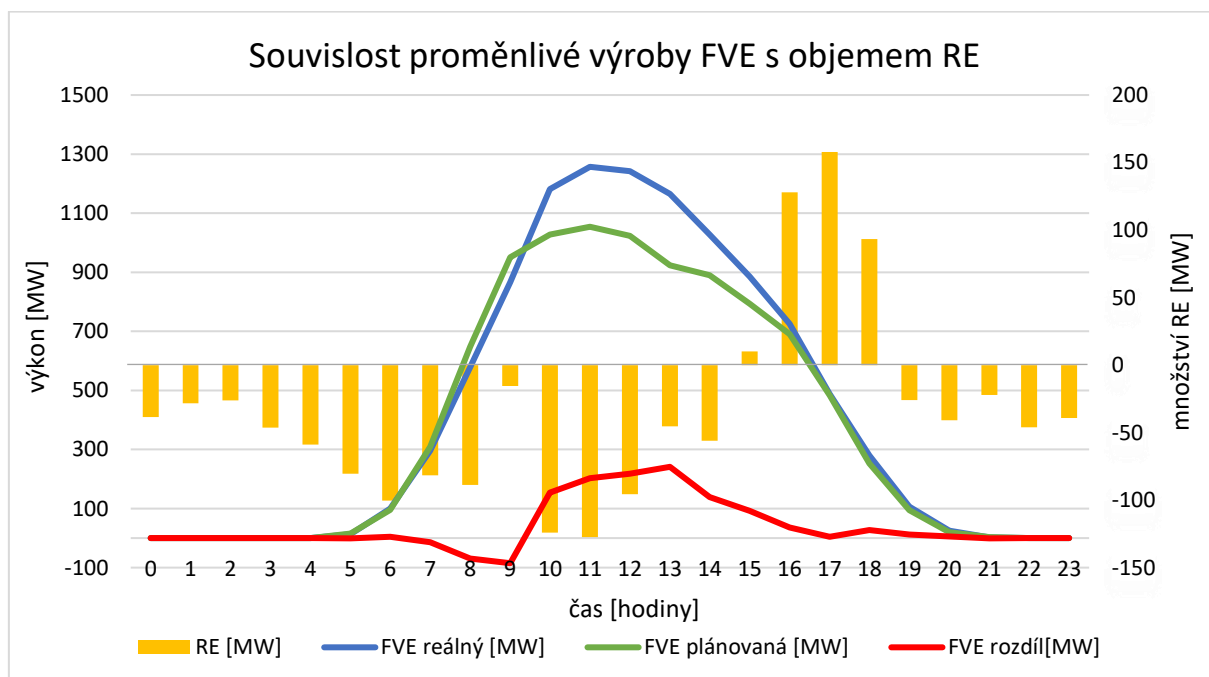
$$Q_c = U_2^2 \omega C = P(tg\varphi - tg\varphi_k) = P \left(tg \frac{Q}{P} - tg \frac{Q_k}{P} \right) [Var], \quad (12)$$

kde C kapacita BESS [Ah]
 U_2 napětí na straně odběratele [V]
 P činný výkon [W]
 Q jalový odebíraný výkon v místě odběru [Var]
 Q_k jalový kompenzovaný odebíraný výkon v místě odběru [Var].

Jak bylo analyzováno BESS zapojená paralelně k odběrovému místu může být mimo funkce omezování odběrových špiček jak ze strany odběratele, tak provozovatele DS či PS ještě využita ke kompenzaci jalového výkonu. Provozovatel BESS může dále využívat její nevyužitou kapacitu pro tzv. energetickou (cenovou) arbitráž, tedy využívání elektrické energie z časů jejich nižších cen a její následné spotřebování anebo v případě obchodníka s elektrickou energií pro následný prodej. V případě výpadku dodávky elektrické energie může tento bateriový systém také zastávat funkci potřebné zálohy elektrické energie. Všechny tyto výhody plynoucí ze zakomponování BESS do uzlů DS budou v budoucnu nepostradatelné.

5.4. BESS ve spojení s OZE

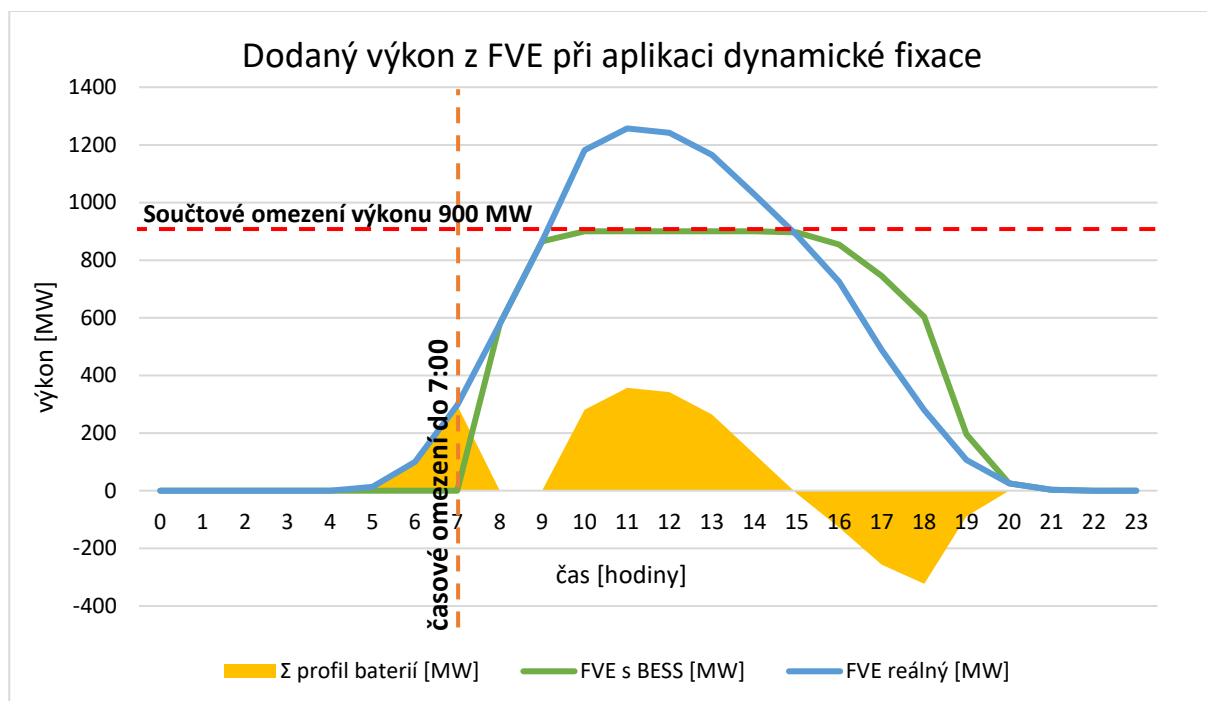
Další velkou oblastí, ve které se nachází obrovský potenciál pro využití bateriových úložišť, je jejich spojení a součinnost s obnovitelnými zdroji elektrické energie, a to zejména u FVE a VTE. Celkový instalovaný výkon těchto zdrojů bude do budoucna bezpochyby narůstat. Dle dokumentu ASEK se do roku 2030 součtová hrubá výroba z FVE a VTE téměř zdvojnásobí oproti roku 2015, a měla by činit zhruba 5200 GWh za rok. [4] Hlavní úskalí těchto zdrojů je však jejich neřiditelnost a částečná nepředvídatelnost finální reálné výroby, která je silně závislá na počasí. Právě bateriové systémy by mohly do budoucna toto hlavní negativum těchto zdrojů pomoci eliminovat a zajistit tak potřebnou flexibilitu sítě v návaznosti na nárůst právě výše zmíněných zdrojů. Základní funkcí akumulace u zdrojů OZE bude vyrovnávání jejich výrobního diagramu, tedy lepší využitelnost vyrobené energie a částečná možnost plánování výroby dle požadavků sítě. Těmito kroky by mohli provozovatelé PS i DS, kteří by vlastnili BESS v blízkosti těchto výroben, **snížovat i své náklady na regulační energii**. Velkým počtem těchto systémů určených k tomuto účelu zajistí lepší využití elektrické energie v potřebných časech, což může vyústit ve snížení potřebného instalovaného výkonu špičkových zdrojů. Na následujícím grafu 17 demonstruji možný vliv FVE, případně VTE na potřebu regulační energie v ES z důvodu jejich nekontrolovatelné výroby. Graf jsem pro co nejlepší přiblížení se reálnému chodu soustavy ČR sestavil na základě údajů o chodu přenosové soustavy, které poskytuje společnost ČEPS. Jedná se o souhrnná data výkonů FVE v ČR ze dne minima zatížení soustavy za rok 2018, které připadlo na den 8. července.



Graf 18 - Souvislost proměnlivé výroby FVE s potřebou RE v ES ČR

Je evidentní, že proměnlivá a nepředvídatelná výroba bude s narůstajícím počtem FVE či VTE v energetickém mixu nadměrně zatěžovat DS i PS a následně i zvyšovat nároky na objem potřebné RE

během dne. Tímto však netvrdím, že vliv na objem RE mají v ES pouze zdroje jako je FVE a VTE. Možným řešením tohoto problému by bylo dle mého názoru řízení výroby z těchto zdrojů právě pomocí BESS a přenos výkonů v časech během dne. Takovéto řešení by mohlo vypadat třeba následovně jak je zobrazeno na *Graf 19*. Toto spojení BESS v FVE mohou nazvat např. výkonovou fixací. S vhodnými měřícími a řídicími obvody bychom mohli také docílit **“dynamického“ omezení (fixace) dodávaného výkonu**, pro které by bylo možné měnit limitní hodnoty maximálních výkonů a časů vždy dle požadované výroby v aktuálním dni v roce s ohledem na předpoklad zatížení soustavy. Tímto řízením dodávaného výkonu do sítě docílíme částečné eliminace neřiditelnosti těchto zdrojů, tedy jejich možné využití jako BASE-Load zdroje. Dále předejdeme jejich negativním vlivům na stabilní chod sítě.

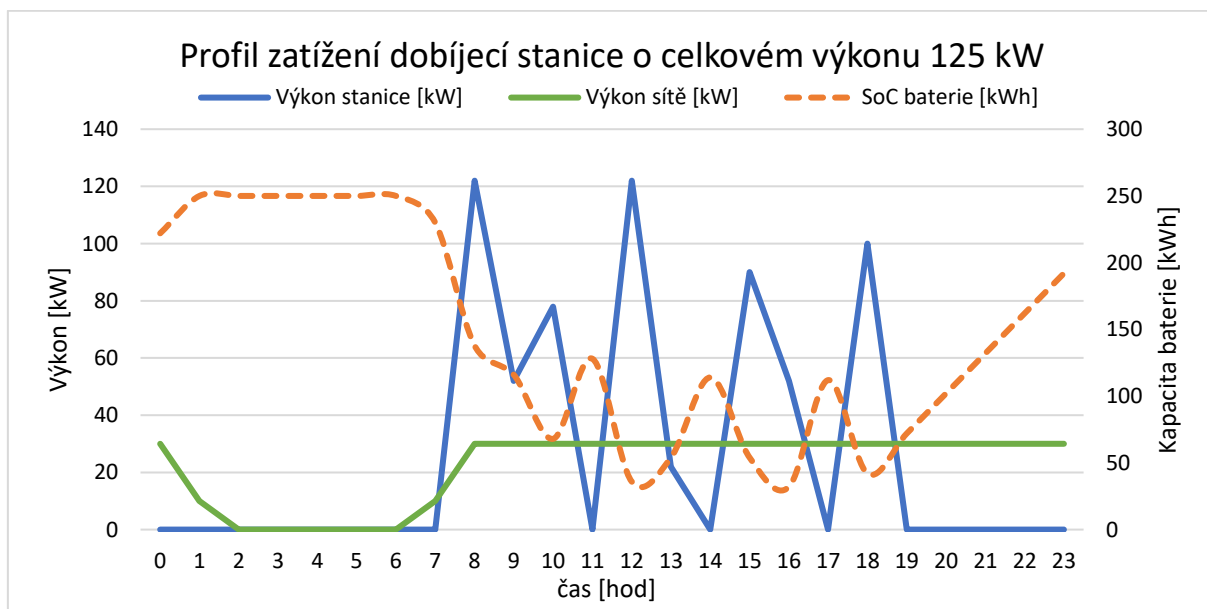


Graf 19 - Aplikace BESS u FVE zdrojů a funkce dynamického omezení

5.5. Omezování vlivů nabíjení EV

S vizí budoucího rozvoje elektromobility zejména ve velkých městech nastává otázka, zdali bude městská distribuční síť schopna zvládnout tento nárůst zatížení vlivem dobíjení velkého množství elektrických vozidel. Vozidla budou z velké části nabíjena v okolí bydliště majitelů, a to zejména v odpoledních a večerních hodinách. Domácí nabíjecí stanice nedisponují extrémními výstupními výkony, ale největší úskalí je shledáno v tom, že vozidla budou majitelé nabíjet ve stejném časovém intervalu a tím dojde k součtu jejich výkonů a k následnému nárůstu zatížení v daném uzlu sítě. Tento proces změny celkový odběrový diagram zatížení a dojde k výrazné odběrové špičce ve večerních hodinách. Tento problém by mohly eliminovat právě menší BESS v domácnostech umístěné u dobíjecích stanic.

Dalším nebezpečím, které bude ohrožovat chod distribuční soustavy ve městech, jsou rychlodobíjecí stanice, které v tlaku na snižování doby dobíjení baterií EV, navyšují své výstupní výkony. Aktuálně dostupné rychlodobíjecí stanice v ČR, které provozuje ČEZ, nabízejí DC konektory, jež jsou schopny nabíjení s výkonem až **50 kW**. Pokud budeme chtít do budoucna pokrýt nárůst počtu elektrických vozidel, bude muset být instalováno těchto dobíjecích stanic vysoké množství a často několik paralelně pracujících na jednom místě. V takto zatěžovaných místech budou vznikat obrovské nárazové odběrové proudy, které by mohly způsobit kolaps lokálního uzlu DS. Abychom předešli těmto negativním jevům, které doprovází dobíjení EV, je opět vhodné využít stacionárního bateriového úložiště, které bude disponovat dostatečnou hustotou elektrické energie, ale také zejména vysokým vybíjecím C-rate. Vysoký vybíjecí C-rate je nutný pro schopnost BESS v krátkém čase pokrýt požadovaný odběr nabíjecích stanic. Těmto náročným požadavkům na vysoký výkon v krátkém čase dokáží dostát bateriové články technologií LFP a LMO. Aplikací BESS jako podpurný systém pro nabíjecí stanice EV se budou muset do budoucna zabývat jak provozovatelé nabíjecích stanic v komerčních budovách, tak majitelé RD. Na následujícím *grafu 19* je zobrazena zjednodušená simulace nabíjecí stanice, která disponuje dvěma DC dobíjecími stanicemi s výkonem 50 kW a jednou AC stanicí s výkonem do 22 kW. Bude se jednat o veřejnou nabíjecí stanici, tudíž budu předpokládat nejvyšší zatížení během dne v časech od 8:00 do 18:00. Mimo tyto časy nebude využívání této stanice brát v úvahu a budu předpokládat dobíjení EV v místech bydliště jejich uživatelů. Baterie bude disponovat kapacitou 245 kWh a maximálním vybíjecím výkonem pro co nejdelší životnost 125 kW. V síti bude pro potřeby dobíjecí stanice rezervován příkon 30 kW. Zbýlý profil dobíjecí stanice bude pokryt z bateriového úložiště.



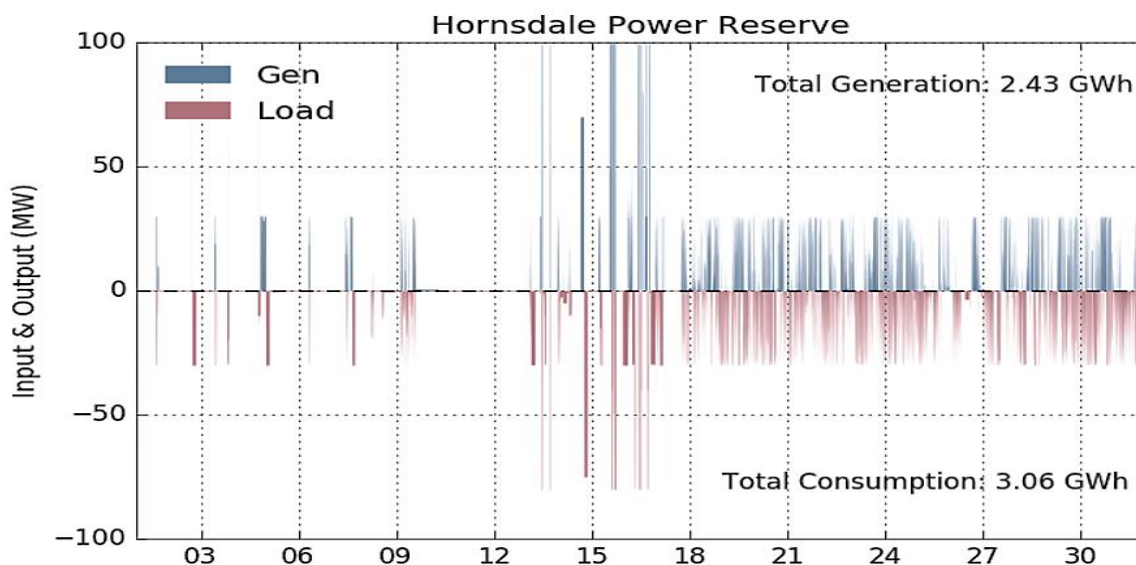
Graf 20 - Profil zatížení spojení BESS a dobíjecí stanice pro EV

Takovýmto spojením bateriového úložiště a nabíjecích stanic docílíme snížení dopadu jejich vysokých odběrů a budeme schopni instalace těchto stanic bez nutnosti navyšování kapacit městské distribuční

sítě. Jak je z *grafu 19* patrné tyto bateriové systémy procházejí velice hlubokými cykly vybíjení (DoD) a tudíž jejich životnost v aplikacích druhotného využití baterií bude razantně nižší.

5.6. Pilotní projekty 2nd life bateriových úložišť

Skutečnost, že není využívání akumulace ve formě baterií ve světě novinkou, dokazuje i analýza z března roku 2019 světové organizace IRENA, která uvádí, že celková instalovaná kapacita velkých bateriových úložišť překonala na konci roku 2018 hranici 10 GWh. [37] Zhruba 90 % z této kapacity je poskytováno Lithium iontovou technologií a je tedy patrné, že tato technologie patří k nejvyužívanější v oblasti velkokapacitních úložišť. Aktuálními evropskými lídry v oblasti velkokapacitní akumulace jsou Německo a Velká Británie. Za zmínku určitě stojí i největší bateriové úložiště na světě, které využívá Lithium iontové bateriové články. Toto úložiště je umístěno u větrné elektrárny Hornsdale na jihu Austrálie. Větrná elektrárna disponuje 99 větrnými turbínami o celkovém výkonu 315 MW. Bateriové úložiště je složeno z celkového počtu 21 700 ks bateriových článků o celkové kapacitě **129 MWh** a její maximální vybíjecí výkon dosahuje hodnoty až **100 MW**. Celkové investiční náklady na výstavbu této akumulace činily 50 milionů dolarů, což je téměř 1,15 miliardy Kč. Uvedený vybíjecí výkon 100 MW je dle kontraktů rozdělen do dvou operačních bloků. První blok o celkovém výkonu 70 MW operuje po dobu maximálně 10 minut a je určen pro potřeby operátora přenosové soustavy v oblasti Australian Capital Territory za účelem udržování výkonové rovnováhy sítě. Tato poskytovaná služba snížila náklady australskému operátorovi na nákup regulační energie za rok 2018 o 90 %. Druhý operační blok s maximálním výkonem 30 MW po dobu aktivace až 3 hodin je využíván provozovatelem úložiště pro využití k již dříve identifikovanému vyrovnávání výroby OZE a přesunu výkonů z časů nízkých cen do časů vysokých cen, jedná se tak o funkci energetické a cenové arbitráže.



Obrázek 9 - Pracovní diagram bateriového úložiště Hornsdale za prosinec 2017 [38]

Na předchozím *obrázku 9* je znázorněn pracovní diagram bateriového úložiště za prosinec 2017. Z tohoto grafu je patrné, že ve dnech 16. a 17. prosince bylo využito obou pracovních bloků v plné výši

vybíjecího výkonu. Dle zprávy o provozu za rok 2018 provozovatele baterie NEOEN mělo úložiště výnosy ve výši 18 milionů australských dolarů, což je zhruba 306 milionů Kč dle aktuálního kurzu. Pokud stanovím odhadem 10 % z této částky jako náklady na provoz a údržbu baterie, lze vypočítat zjednodušeně prostou dobu návratnosti.

$$T_p = \frac{Investice}{CF} = \frac{1\,150}{0,9 \cdot 306} = \frac{1150}{275,4} = \mathbf{4,17\ roku} \quad (12)$$

Z tohoto zjednodušeného výpočtu je patrné, že se investice do obdobných bateriových aplikací aktuálně jeví jako ekonomicky silně rentabilní. V této diplomové práci se však primárně zabývám myšlenkou **využití vyřazených baterií z elektromobilů**, a je tedy nutné zjistit, zdali se již i tyto typy bateriových úložišť reálně využívají nebo jsou stále jen pouhou teoretickou myšlenkou budoucí moderní energetiky. Za tímto účelem se zaměřím na analýzu nejzajímavějších pilotních projektů v této oblasti. Analýzu provedu pouze pro tzv. grid scale úložiště, tedy pouze ta, která mají za úkol plnit aplikace popsané v předešlých podkapitolách. Bateriovými aplikacemi malých výkonů a kapacit často využívaných v domácnostech se v této práci nebudu zabývat.

Aktuálně **největší aplikací vyřazených baterií v Evropě je bateriové úložiště BESS Vattenfall**, které je umístěno přímo u on-shore větrné farmy Pen y Cymoedd v Jižním Walesu o jmen. výkonu 228 MW. [39] Toto bateriové úložiště bylo nainstalováno za účelem poskytování dvou hlavních služeb a to:

- Vyrovnávání výrobního diagramu VTE a docílení lepšího rozložení dodávaného výkonu během dne dle aktuálního zatížení sítě.
- Poskytování podpůrných služeb přenosové sítě, přesněji poskytování tzv. **EFR** neboli Enhanced Frequency Response. Služba EFR je unikátní novou službou reagující na obměnu energetického mixu UK a nárůst zejména větrných elektráren. Služba funguje obdobně jako dříve definovaná FCP, tedy proporcionálně a automaticky, s rozdílem požadavku na dosažení 100 % smlouveného výkonu a to do 1 sekundy. Aktuálně je v roce 2019 v rámci služby EFR rezervováno **201 MW** výkonu dodávaného bateriovou akumulací.

Tabulka 10 - Technické parametry BESS Vattenfall UK

Vattenfall UK South Wales BESS	
Jmenovitá kapacita [MWh]	13,2
Maximální výkon [MW]	22
Počet battery packů [ks]	500
Původ baterie	BMW i3
Chemie článků	NMC
Vybíjecí C-rate	1,7
Maximální C-rate chemie NMC	2

V současnosti největší evropský systém akumulace energie využívající vyřazené baterie z xEV, který poskytuje komplexní služby komerční budově, byl uveden do provozu na konci června roku 2018

v Amsterdamu. Tento inovativní projekt s názvem Amsterdam Energy Arena (AEA) vznikl za spolupráce společností NISSAN a EATON a poskytuje největšímu sportovnímu stadionu v Amsterdamu spolehlivější a efektivnější dodávku elektrické energie. Toto úložiště se skládá z kombinace vyřazených baterií z první generace vozu LEAF, která využívala bateriové články typu LMO a z druhé generace, která již přešla na bateriové články chemie NMC. [40] Komplexnost této akumulace se nachází ve velkém počtu poskytovaných služeb:

- Vyrovnávání výrobního diagramu a zvyšování efektivity vlastní spotřeby z instalované FVE na stadionu disponující špičkovým výkonem 1128 kWp.
- Záložní zdroj napájení a poskytování energie pro nouzový a ostrovní režim chodu stadionu v návaznosti na snižování využívání diesel generátorů.
- Snižování dopadu vysokého odběru na městskou distribuční síť v časech konání sportovních událostí – Peak shaving, Load shifting.
- Poskytování dostatečné energie v krátkém čase pro pokrytí vysokých výkonů pro nově instalované dobíjecí stanice pro xEV v prostorách stadionu. V současnosti stadion disponuje 18 dobíjecími stanicemi a do dvou let se plánuje výstavba dalších 200 dobíjecích stanic.
- V časech vyššího zatížení soustavy v Amsterdamu bude zhruba polovina výkonu baterie vyhrazena pro stabilizaci Dutch energy grid a poskytování regulace frekvence.

Tabulka 11 - Technické parametry BESS Amsterdam Energy Arena

Amsterdam Energy Arena	
Jmenovitá kapacita [MWh]	2,8
Maximální výkon [MW]	3
Počet battery packů [ks]	148
Původ baterie	Nissan LEAF
Chemie článků	NMC, LMO
Vybíjecí C-rate	1,1
Maximální C-rate chemie LMO	1
Maximální C-rate chemie NMC	2

Dle prvotních analýz fungování a využití akumulace AEA se odhaduje, že se **reálná doba návratnosti investice pohybuje v intervalu od 8 do 10 let** v závislosti na budoucím vývoji faktorů jako jsou ceny elektrické energie, plnění plánů výstavby dobíjecí infrastruktury a výše kompenzací za poskytování podpůrných služeb sítě.

Oblast využití bateriových akumulací, ve které vidím největší potenciál a který zároveň vychází z jejich technických parametrů, a to zejména v návaznosti na vysoké výkony dosahované v minimálním čase, je poskytování primární regulace frekvence či ostatních služeb reagujících na odchylky frekvence v síti. V sousedním Německu jsou již služby řízení frekvence sítě poskytovány z velké části právě těmito akumulacemi. Za rok 2018 byla stanovena pro Německou ES průměrná záloha pro služby FCP ve výši

600 MW. Záloha je vypisována otevřenými tendery na týdenní bázi, není tedy během roku konstantní. Tato celková výkonová záloha je rozdělena mezi čtyři logické územní celky pro udržení stability a bezpečnosti poskytování služby FCP. Tyto celky jsou děleny mezi jednotlivé operátory přenosové soustavy v Německu. Co je však zajímavé, je ta skutečnost, že aktuálně téměř 400 MW z této potřebné rezervy výkonu je poskytována skrze bateriová úložiště. Z těchto 400 MW rezervovaného výkonu je aktuálně **30 MW výkonu poskytováno bateriovými úložišti využívající vyřazené baterie z elektrických vozidel**. Uvedených 30 MW je rozděleno mezi následující tři bateriové akumulace[20]:

- Daimler, The Mobility House, Hannover - 15 MWh,
- Daimler, The Mobility House, Lünen - 13 MWh,
- BMW, Bosch, Vattenfall Hamburg - 2 MWh.

Rozmístění kompletní výkonové zálohy poskytnuté bateriovými úložišti na území Německa je k nahlédnutí v *Příloze č. 1*.

V této podkapitole jsem dle analýzy pilotních projektů došel k důležitému zjištění a to, že již v současné době **existují pilotní projekty využívající sekundární baterie a jsou plně schopné reálného provozu**. Nejstarší bateriový systém tohoto typu je v provozu od roku 2016 a lze tedy předpokládat, že jsou tyto systémy svým technickým stavem a technickými parametry využitelné i pro nasazení do prostředí chodu české ES.

5.6.1. Bateriová úložiště v České republice

Za aktuálního stavu rozvoje akumulace v ČR existuje již několik pilotních projektů velkých bateriových úložišť využívající technologii Li-ion. Nejedná se však o BESS složené z druhotných bateriových modulů, ale jejich aplikace a využívání je však podmíněno stejnými legislativními podmínkami ČR, proto pro úplnost analýzy oblasti problematiky BESS tyto projekty uvádím níže. Údaje byly zjištěny během osobní konzultace s panem Fouskem z asociace AKU-BAT.

Stávající bateriová úložiště v ČR:

- **BESS Prakšice** – První velkokapacitní bateriové úložiště v ČR, jehož provoz byl spuštěn v listopadu roku 2017 a je provozováno společností Solar Global. BESS disponuje kapacitou 1,2 MWh, výkonem 1 MW a je umístěno u FVE Prakšice s instalovaným špičkovým výkonem 683 kWp. V tomto spojení s FVE zastává BESS funkci vyrovnávání výrobního diagramu výroby OZE a funkci load shifting. Celková investiční náklady činily cca 20 mil. Kč.
- **BESS Mydlovary** – Bateriové úložiště je provozováno společností E.ON a je umístěno v areálu teplárny Mydlovary, která spaluje zemní plyn a také biomasu. Výkon tohoto BESS činí 1 MW a disponuje kapacitou 1,75 MWh. Společnost E.ON využitím baterie u rozvodny 110/22 kV

provozuje energetickou arbitráž a load shifting v návaznosti na její inovativní projekt virtuální baterie. Investiční náklady tohoto úložiště činily 22 mil. Kč.

- **BESS Obořiště** – Aktuálně nejkomplexnější bateriové úložiště v ČR, které bylo prezentováno v srpnu 2018 a disponuje výkonem 1 MW a kapacitou 1,3 MWh. Jeho odlišnost od předchozích dvou úložišť je v tom, že bateriový kontejner obsahuje již i vysokonapěťový rozvaděč a transformátor. Toto BESS by mělo být schopno poskytovat veškeré aplikace, které byly již analyzovány, a je vhodné díky spojení technologicky vyspělého střídače a BMS i pro regulaci U/Q. Investiční náklady komplexního řešení BESS činily 25 mil. Kč.

Chystané projekty bateriových úložišť v ČR:

- **BESS Tušimice** – Bateriové úložiště o plánovaném výkonu 3 MW, které bude umístěno v areálu elektrárny Tušimice II. Tento pilotní projekt společnosti ČEZ ve spolupráci se společností ČEPS má sloužit jako testovací BESS pro ověření schopnosti bateriové akumulace reálně poskytovat různé režimy SVR, dříve PpS.

6. Současné překážky v rozvoji akumulace v ČR

V předchozí kapitole bylo analýzou zjištěno, že již některé země v Evropě (Německo, UK) mají relativně vysoký objem bateriové akumulace, které se podílejí na poskytování SVR, zejména na regulaci frekvence v síti. Na důvody, kvůli kterým není tento stav rozvoje akumulace v České republice totožný s těmito zeměmi a je teprve v počáteční fázi s několika pilotními projekty, se zaměřím v této kapitole.

6.1. Legislativní rámec akumulace v ČR

V současné době je rychlejší rozvoj akumulace ve formě bateriových systémů brzděn zejména legislativním rámcem České republiky. Největší současná legislativní překážka vychází ze současného znění Energetického zákona, který vydává MPO, a v němž není doposud pojem akumulace definován. V připravované novele energetického zákona (NEZ), která je projednávána od roku 2017, měl být již pojem akumulace energie dle náměstka MPO právně ukotven a to následovně: *„Ukládáním elektřiny se rozumí ukládání elektřiny akumulacním zařízením do formy energie, která může být uložena a následně přímo použita nebo převedena na elektřinu nebo jinou formu energie a použita v pozdější okamžik nežli v okamžik, kdy byla vyrobena.“* Na konci roku 2018 byla NEZ předána k připomínkovému řízení a v únoru roku 2019 mělo MPO případné připomínky zpracovat a předat NEZ k projednání vládě ČR. Z časových důvodů se však projednávání NEZ rozdělila na dvě samostatné části:

- 1. část – nezbytně nutné úpravy EZ,
- 2. část – zbytek úprav EZ, které zahrnují zmíněnou oblast akumulace a její definici.

Právě v případě druhé části NEZ došlo k odložení jejího projednání a zpracování připomínek. Za stávající situace tedy zůstává bateriová akumulace stále v NEZ právně nedefinována. Případné schválení

definice akumulace v 2. části NEZ by pro bateriové akumulace znamenalo jejich plné využívání přidružené u výroby elektřiny, která je držitelem licence na výrobu, anebo jejich využití operátorem přenosové soustavy, který je držitelem licence na přenos elektrické energie. Za tohoto stavu by však velká bateriová úložiště **nemohla být stále provozována jako samostatná licencovaná energetická zařízení** a jejich využitelnost a přínos pro budoucí vize decentralizované energetiky s vysokým podílem OZE na výrobě bude stále velice limitován. Do poloviny roku 2019 by měla být také schválena Evropskou radou finální verze Zimního balíčku tzv. Clean Energy Package [41], který s sebou přináší povinnost pro členské státy EU implementovat do jejich národní legislativy právní předpisy vycházející právě ze ZEB. Po oficiálním uvedení ZEB v platnost budou mít členské státy 1 až 2 roky na to, aby všechny právní předpisy do svého legislativního rámce implementovaly, tedy počítáme **do roku 2021**. V oblasti akumulace došlo ve finální verzi ZEB k velice pozitivním závěrům:

- Každý vlastník akumulačního zařízení má právo jej připojit do sítě a toto připojení mu musí být umožněno v přiměřeně dlouhém období od jeho žádosti.
- Je zakázáno odlišné zpoplatnění pro akumulační zařízení jak v případě odběru elektrické energie, tak v případě poskytování SVR či dalších PpS.
- Provozovatel akumulačního zařízení má právo poskytovat více typů služeb na jednom zařízení.

Dalším důvodem, proč by měla být akumulace v rámci NEZ ukotvena a definována důkladněji a podrobněji je také ten, že strategické dokumenty ČR v oblasti energetiky, jako např. NAP SG a ASEK, již ve svých scénářích dlouhodobě s akumulací počítají. V NAP SG bylo již s akumulací jako samostatně provozovaným energetickým zařízením počítáno již od roku 2017. [42] Je tedy patrné, že za aktuální situace je akumulace v připravované NEZ ukotvena absolutně nedostatečně a již nyní je téměř jasné, že se předpisy plynoucí ze ZEB v oblasti akumulace nepodaří v České republice implementovat ve vymezeném čase. Pro nejideálnější podporu rozvoje bateriové akumulace v ČR by se mělo v rámci novely EZ objevit následující:

- ✓ **Zavedení samostatné licence pro podnikání v energetickém odvětví pro akumulační zařízení.**
- ✓ **Definovat ukládání elektřiny jako předmět podnikání v energetických odvětvích.**
- ✓ **Uspodnění připojení akumulačního zařízení jako samostatně stojící energetické zařízení k elektrizační soustavě.**

Pokud by byly výše zmíněné body splněny, nebyl by již rozvoj akumulace brzděn z pohledu legislativy. MPO se však dle svého vyjádření nechystá do 2. části připravované NEZ zakomponovat výše zmíněné body a akumulaci plně legislativně ukotvit plánuje až v následující novele energetického zákona, pro kterou aktuálně zpracovává věcný záměr.[43] Tento plán však pouze oddálí plné otevření trhu pro bateriovou akumulaci. Dle odhadů a s ohledem na dobu projednávání současné novely energetického zákona bude **akumulace v české legislativě plně definována zhruba v letech 2022 až 2023**.

6.1.1. Akumulace v Kodexu přenosové soustavy ČEPS

V předchozí kapitole byla analyzována současná situace české legislativy v oblasti nasazování bateriových akumulacních zařízení a bylo zjištěno, že za současné situace není plošně nasazování velkokapacitních akumulací právně možné, a to zejména jako samostatné energetické zařízení. Dokument Kodex přenosové soustavy společnosti ČEPS určuje mimo jiné i technické a obchodní podmínky pro poskytovatele SVR (PpS) v České republice. V dubnu roku 2019 prošel tento dokument revizí schválenou ERÚ a došlo k výrazným změnám v postoji k bateriovým akumulacím jako k účastníkovi trhu se SVR. Bateriové akumulacní systémy mohou být aktuálně využívány v omezené míře pro poskytování SVR formou tzv. fiktivního bloku (FB), což je spojení více druhů energetických zařízení do jedné součinné konfigurace, která poskytuje příslušnou SVR. Přípustné varianty poskytování SVR fiktivním blokem jsou dle Kodexu ČEPS následující [34]:

- FB řízený přímo dispečinkem ČEPS poskytující některou ze SVR samostatně nebo jejich kombinací.
- FB řízený jiným subjektem s možností poskytování FCR pro ČEPS na energetických zařízeních k tomu vyhovujících, ze kterých je FB sestaven.

Provoz FB a poskytování dané SVR se vždy hodnotí jako celek a **musí být i jako celek pro danou SVR certifikován**. Certifikace zařízení je jednou ze čtyř obecných požadavků pro každé zařízení poskytující SVR. Certifikace zahrnuje prokázání schopnosti poskytovat zvolenou SVR či jejich kombinace dle přesně definovaných periodických testů. Mezi ostatní obecné požadavky na zařízení poskytující SVR patří:

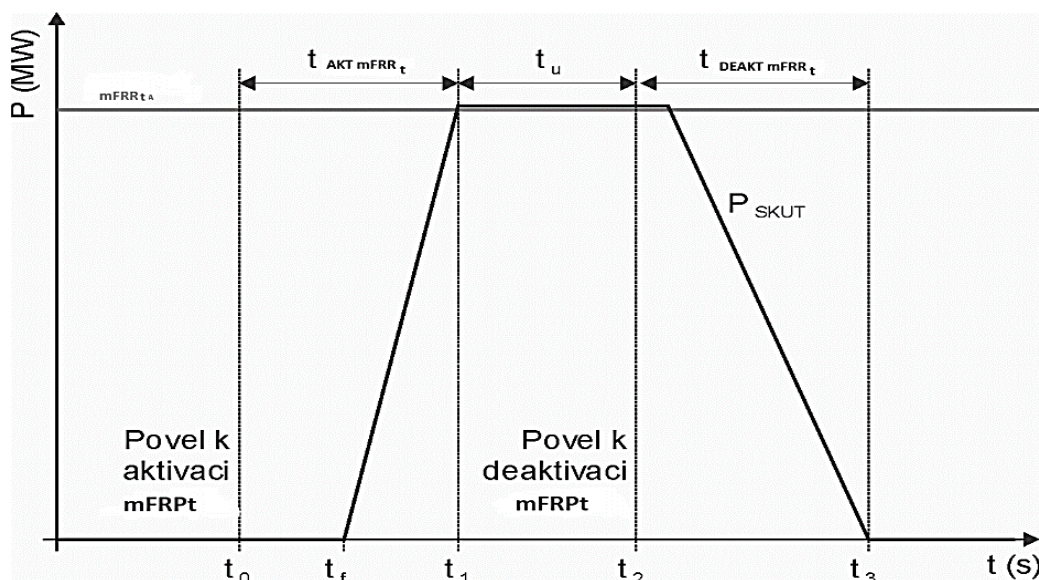
- měřitelnost – se stanovenými kvantitativními parametry a způsobem měření,
- garantovaná dostupnost služby s možností vyžádat si inspekci,
- možnost průběžné kontroly poskytování.

Fiktivní blok, který umožňuje využití bateriové akumulace pro poskytování SVR řízený i jiným subjektem než přímo dispečinkem společnosti ČEPS, je možno provozovat pouze pro službu FCP. V Kodexu ČEPS je fiktivní blok označován jako FB (PEot + PSE + BSAE). Tento FB je tvořen např. kombinací parní elektrárny s odběry tepla (PEot), plynové a spalovací elektrárny (PSE) a bateriového systému akumulace elektrické energie (BSAE). Dalším FB, který připadá v úvahu, je spojení BSAE a výroby OZE. V případě připojení takto konfigurovaného FB pro poskytování zvolené SVR do distribuční soustavy, je poskytovatel povinen zajistit souhlas provozovatele DS s poskytováním SVR ve sjednaném rozsahu se společností ČEPS. Dále musí poskytovatel společnost ČEPS informovat o plánovaných odstávkách vedení DS, kterými je FB připojen do DS.

Využívání BSAE pro poskytování SVR jako součást FB by se mohlo na první pohled zdát již jako fungující částečné otevření současného trhu se SVR bateriové akumulací. Jejich nasazování je však při

podrobnějším prozkoumání technických požadavků na jejich provoz a participaci při zajišťování výkonu pro danou SVR stále velice omezené. V Kodexu ČEPS lze nalézt následující požadavky pro jednotlivé SVR, které jsou součástí testů pro udělování certifikace daného FB a reprezentují tedy jejich reálný provoz při poskytování SVR.

- **Služba FCP** – podíl velikosti příspěvku FCR od BSAE musí být do 45 sekund plně nahrazen výkonem ostatních energetických zařízení, které společně tvoří fiktivní blok. Podíl výkonu od BSAE nesmí po uplynutí času 45 sekund přesahovat hodnotu $\pm 5\%$.
- **Služba aFRP** – příspěvek výkonu BSAE na službě aFRP musí být do 90 sekund plně nahrazen výkonem ostatních energetických zařízení, které společně tvoří fiktivní blok. Výkon na svorkách BSAE nesmí přesáhnout $\pm 1\%$ po uplynutí stanovené doby 90 sekund.
- **Služba mFRPt** – požadavky pro funkci BSAE ve FB pro poskytování této SVR budou vysvětleny dle následujícího grafu, který reprezentuje průběh aktivace a deaktivace této služby.



Obrázek 10 - průběh certifikačního testu služeb mFRPt [34]

Služby mFRPt jsou poskytovány na žádost operátora společnosti ČEPS. V čase t_0 dojde k obdržení povelu k aktivaci dané minutové zálohy. Čas t_f reprezentuje čas přifázování energetického zařízení k ES či jeho počáteční aktivaci. Do času t_1 musí energetické zařízení najet na svůj maximální rezervovaný smluvený výkon. Čas t_1 je dán dle typu poskytované služby následovně: $t_1 = t + n$, kde n reprezentuje maximální povolené zpoždění dosažení maximálního výkonu dané služby. Pro mFRP₅ je $n = 1$ min a pro mFRP₁₅ je $n = 3$ min. Po uplynutí doby $t_u = 30$ min, dojde k zaslání požadavku na deaktivaci dané služby v čase t_2 . Do času t_2 musí být celá hodnota rezervovaného výkonu daného FB s BSAE dosažena změnou výkonů na ostatních energetických zařízeních tvořící s BSAE fiktivní blok. Tedy výkon na svorkách BSAE musí být do času t_2 nulový. Z tohoto požadavku plyne závěrem to, že se

bateriové systémy v rámci fiktivního bloku s konvenčními energetickými zdroji budou podílet zejména na najíždění výkonu na jmenovitou hodnotu, a nikoliv na poskytování výkonu v průběhu poskytování celé služby.

- **Služba RR** – požadavek na fungování BSAE v rámci FB při poskytování této služby jsou obdobné jako u minutových záloh, tedy služeb mFRPt. Opět musí být celý rezervovaný výkon dosažen do času t_2 změnou výkonu na ostatních energetických zařízeních ve FB mimo BSAE. V čase t_2 musí být výkon na svorkách BSAE taktéž nulový. Jediný rozdíl oproti požadavku na mFRPt je v tom, že čas $t_2 = t_1 + t_u$, kde t_u i t_1 jsou rovny 30 minutám.

Další technická podmínka pro provoz FB s BSAE, která vychází z Kodexu ČEPS a platí pro všechny služby výkonové rovnováhy bez rozdílu, je, že rozdíl úrovně nabití BSAE před a po ukončení certifikačních testů **nesmí překročit ± 5 % jmenovité hodnoty kapacity**. Celkově tyto definované technické podmínky provozu FB zcela znemožňují participaci FB tvořeného z výroby OZE a přidružené BSAE na poskytování SVR, jelikož výrobní OZE nedokáže garantovat převzetí výkonu po uplynutí možnosti využívání BSAE. Pro provoz FB složeného z klasického konvenčního zdroje a BSAE jsou podmínky pro jejich provoz velmi omezující a baterie zdaleka nevyužije svůj plný potenciál.

Pro fungování ostatní skupiny SVR tzv. **nefrekvenčních služeb** není v Kodexu ČEPS aktuálně zmíněno využívání BSAE, budu tudíž předpokládat, že za stávající situace se s využíváním BSAE pro tyto služby nepočítá. Za výše definovaných legislativních podmínek a nařízeních plynoucích pro poskytování služeb výkonové rovnováhy vidím ve vytvoření fiktivního bloku s BSAE největší potenciál zejména pro klasické energetické zdroje a teplárny, které např. nedokáží změnit svůj výkon pro danou službu (zejména mFRP₅) tak rychle, jak je požadováno dle potřeb Kodexu ČEPS. **Bateriový systém akumulace pokryje počáteční fázi nájezdu výkonu a vytvoří tak dostatečný čas pro najetí klasického točivého zdroje na požadovanou hodnotu.** Tímto spojením BSAE a klasických energetických zdrojů dojde k rozšíření portfolia možných poskytovaných služeb těchto energetických zařízení a ke zdroji dalších možných příjmů, které jsou aktuálně pro teplárny téměř nutností pro další budoucí provoz.

6.2. Ekonomické aspekty akumulace

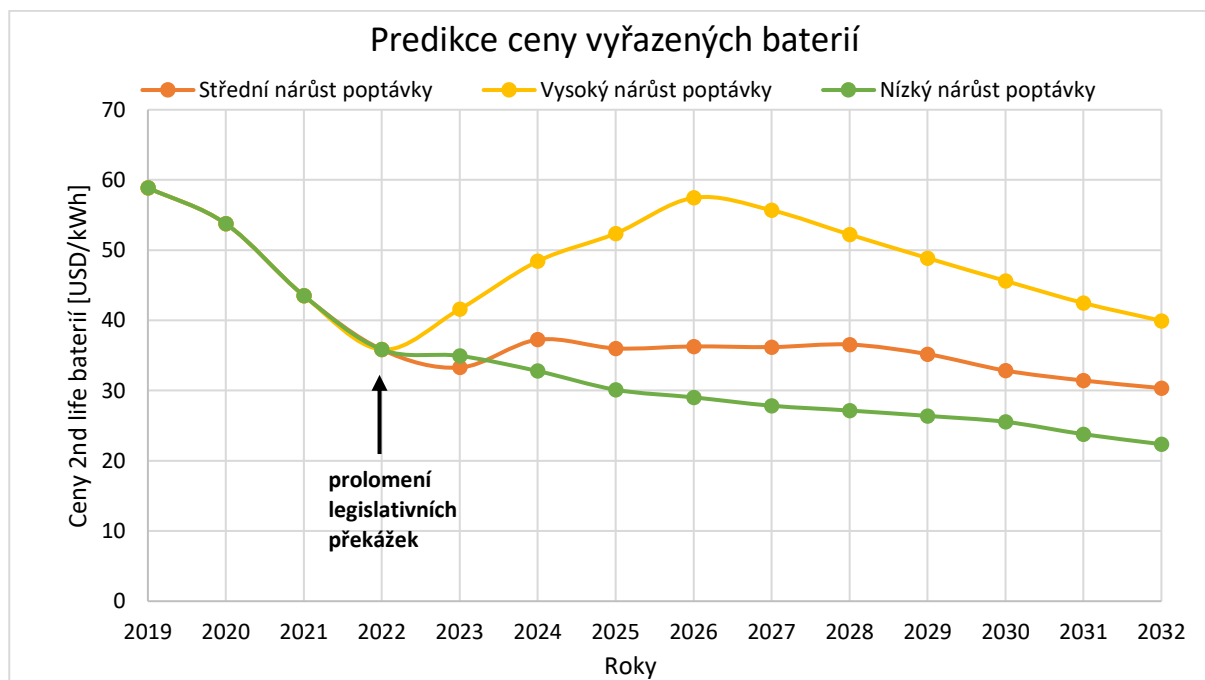
To, že je bateriová akumulace stále relativně drahou technologií je obecně známý fakt. Avšak jak již bylo analyzováno v *Graf 6 - Vývoj TCO v závislosti na ceně baterií* v podkapitole 2.4. Budoucnost elektromobility, tak průměrná cena bateriové akumulace již prolomila hranici **200 USD/kWh**. Cena vyřazených baterií z elektrických vozidel by se měla pohybovat ještě na znatelně nižších hodnotách. A právě určení výsledné ceny vyřazených baterií je pro jejich budoucí využití a hodnocení ekonomiky provozu během doby životnosti v sekundárních aplikacích naprosto klíčové. Jejich snížená pořizovací

- Koeficient poptávky po vyřazených bateriích** ($k_{\text{poptávka}}$) – jako poslední koeficient pro stanovení ceny vyřazených baterií jsem stanovil koeficient reprezentující situaci na trhu s bateriovou akumulací. Tento koeficientu bude přímo určen výší poptávky po bateriové akumulaci v ČR. Za aktuální situace dle předchozí kapitoly 6.1. *Legislativní rámec akumulace v ČR* je aktuálně stav trhu s akumulací v ČR teprve v počátcích, čemuž napovídá i velmi malý počet akumulčních zařízení v ČR, jež jsou provozovány spíše v “testovacím režimu“. Z těchto důvodů stanovím počáteční hodnotu tohoto koeficientu na hodnotu 0,4. V dalších letech po překonání legislativních překážek (odhad rok 2022) a nastartování rozvoje akumulace v ČR budu predikovat nárůst tohoto koeficientu. Koeficient $k_{\text{poptávka}}$ bude nabývat hodnot opět z uzavřeného intervalu od 0 do 1.

Dle výše definovaných koeficientů jsem sestavil následující rovnici, která bude využita pro výpočet výsledné ceny vyřazených baterií v závislosti na aktuální ceně nových baterií během let.

$$Cena_{VB_t} = k_{\text{poptávka}_t} \times k_{\text{repurposing}_t} \times k_{\text{SOH}_t} \times cena_{NB_t} \quad (14)$$

Na následujícím grafu 20 jsem vynesl predikci ceny vyřazených baterií během následujících let. Vývoj ceny nových baterií jsem založil na již analyzovaných datech z Graf 6 - *Vývoj TCO v závislosti na ceně baterií*. Jelikož předpokládám, že největší vliv na výslednou cenu baterií bude mít velikost poptávky, sestavil jsem predikci pro tři možné scénáře v závislosti právě na nárůstu tohoto koeficientu.



Graf 21 - Možné scénáře vývoje ceny vyřazených baterií v ČR

Jak je patrné z tohoto grafu, tak v případě vysokého nárůstu poptávky po prolomení legislativních překážek dojde ke strmému nárůstu ceny vyřazených baterií. V případě středního scénáře bude vliv

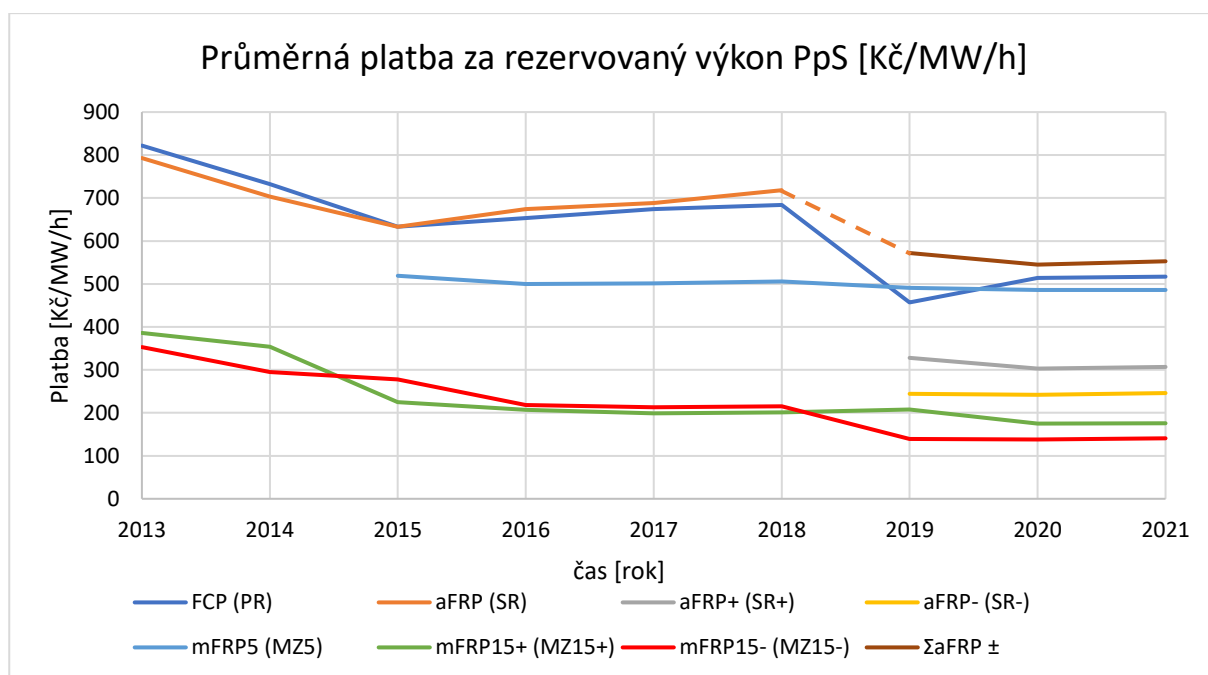
nárůstu poptávky po těchto bateriích kompenzovat pokles ceny nových baterií a cena bude během let zhruba konstantní a bude se pohybovat okolo 35 USD/kWh.

6.2.2. Trh s PpS

Z mnoha předchozích kapitol je patrné, že velká část bateriových systémů bude v budoucnu nacházet uplatnění na trhu s podpůrnými službami sítě. Právě z tohoto důvodu se v této podkapitole zaměřím na fungování trhu nově se SVR a výši kompenzací za poskytování rezervovaného výkonu pro jednotlivé SVR. Analyzována bude také výše platby za dodanou regulační energii. Společnost ČEPS obstarává jednotlivé PpS dle jejího druhu třemi možnými způsoby a to[33]:

- 1) **Dlouhodobé kontrakty na základě vypsaného výběrového řízení** (FCP, aFRP, mFRP, RRP, SV₃₀) - u těchto kontraktů je stanovena výše platby za rezervovaný výkon na energetickém zařízení v Kč/MW/h. Následně s výjimkou služby FCP je prováděna platba za dodanou RE ve výši, ve které byla regulační energie dle měření dodána za aktivované období. Tímto způsobem je zajištěno zhruba 90 % celkového objemu SVR. U tohoto způsobu obstarání SVR je nutná certifikace bloků.
- 2) **Nákup na denním trhu s PpS** (FCP, aFRP, mFRP, RRP, SV₃₀) – na denním trhu s PpS je obstaráváno zbylých 10 % objemu SVR. Výše platby za poskytnutí SVR je tvořena pro každou obchodní hodinu tzv. marginální cenou, což je cena nejdražší přijaté nabídky pro konkrétní SVR. Uvedenou cenou jsou následně zaplaceny všechny akceptované nabídky v uvedené obchodní hodině. U tohoto způsobu obstarání SVR je nutná certifikace bloků.
- 3) **Přímá smlouva s dodavatelem** (SRUQ, BS, OP) – tyto nefrekvenční služby společnost ČEPS zajišťuje pomocí přímé smlouvy s dodavatelem. Cena je dohodnuta mezi zúčastněnými stranami pro každou smlouvenou hodinu a její výše musí být stanovena v rámci běžných cen na trhu. V kodexu ČEPS není uvedeno využívání BSAE u těchto služeb, proto je nebudu jako možné budoucí využití BESS dále brát v úvahu. U tohoto způsobu obstarání SVR není nutná certifikace bloků.

Pro analyzování nejhodnější SVR z hlediska ekonomiky provozu BESS při participaci na dané SVR je nutno zjistit, jaké celkové příjmy mohou plynout z poskytování těchto služeb. Za tímto účelem provedu zjištění aktuální struktury nakupovaných SVR pomocí výběrových řízení a výše kompenzací, které jsou provozovateli energetického zařízení nabízeny za rezervovaný výkon a případně dodanou RE. Na následujícím grafu jsem na základě dokumentů ČEPS Příprava provozu soustavy a Vážené ceny PpS pro jednotlivé roky vynesl průměrné ceny za rezervované výkony jednotlivých PpS během let. Ceny pro jednotlivé služby jsou zprůměrovány za celý rok, jelikož některé služby nemají konstantní výši plateb za rezervaci během průběhu celého roku. Dále se ceny za rezervovaný výkon liší také i v jednotlivých kalendářních týdnech dle toho, zdali se jedná o pracovní dny nebo dny během víkendu, či noc.



Graf 22 - Historický vývoj plateb za rezervovaný výkon PpS v České republice

Z grafu 21 je patrné, že platby za rezervovaný výkon pro téměř všechny PpS v ČR s výjimkou mFRP5 do roku 2019 dlouhodobě klesaly. Dlouhodobější pokles plateb za poskytovaný rezervovaný výkon pro služby výkonové rovnováhy byl způsoben poklesem cen silové elektřiny na energetických burzách. Z tohoto důvodu provozovatelé elektráren hledají jiný způsob zajištění potřebných příjmů, které jim nabídlo právě poskytování PpS. V návaznosti na tuto situaci vznikla na trhu s PpS značná konkurence, jelikož o vypisovaná výběrová řízení soutěží znatelně více subjektů, a právě toto navýšení konkurence způsobilo zmíněný pokles cen PpS. Od roku 2019 je patrné ustálení plateb za jednotlivé PpS. Ceny PpS jsou známé na následující roky, jelikož společnost ČEPS vypsala výběrová řízení na roky 2019, 2020 a 2021 již dne 12. 03. 2018. Tento fakt znamená to, že požadované objemy rezervovaných kapacit jednotlivých PpS, které jsou nakupovány dlouhodobými kontrakty, jsou až do roku 2021 plně pokryté a případná účast nově vystavené BESS bude připadat v úvahu zřejmě až pro rok 2022. Tento rok také dokonale koreluje s rokem, ve kterém dle předchozí kapitoly očekávám prolomení legislativních překážek, tedy kdy by mohly být BESS plošně provozovány jako samostatně stojící energetická zařízení. Mohla by nastat otázka, zdali by se vyplatilo vystavět bateriové úložiště s cílem zúčastňovat se denního trhu s PpS. Jak již bylo zmíněno, je na tomto trhu nakupováno cca 10 % PpS, avšak například v rámci služby FCP je procento nakupovaného objemu záloh této služby téměř nulové. Z tohoto důvodu se pokusím zaměřit na předpověď vývoje cen jednotlivých SVR do budoucna.

Při poskytování a aktivaci služeb výkonové rovnováhy, kromě služby FCP, je poskytovatelem “dodávána“ buď záporná či kladná RE. Za tuto energii dostává subjekt, který energii dodal, platbu dle celkového objemu dodávky RE v daném časovém intervalu aktivace, a to v následující výši:

- **Služba aFRP** – kladná RE je kompenzována ve výši 2350 Kč/ MWh, záporná RE ve výši 1 Kč/ MWh.
- **Služby mFRPt** – u těchto služeb je cena za RE stanovena nabídkovou cenou. Tyto nabídky jsou poté sjednoceny do tzv. žebříčkové ceny a společnost ČEPS aktivuje dle potřebného objemu cenově nejnižší nabídky. Nabídkové ceny se liší dle ročního období či aktuální situace v ES. Nabídkové ceny jednotlivých poskytovatelů jsou značně rozdílné a pohybují se v rozmezí od 4 000 Kč/MWh až do 10 000 Kč/MWh.

Za účelem stanovení budoucích cen jednotlivých služeb výkonové rovnováhy je nutno se zaměřit na aktuální dění na evropském trhu se SVR, který v současnosti prochází velkými změnami a tyto změny jednoznačně v blízké budoucnosti ovlivní fungování trhu se SVR v ČR. **Jednou z hlavních změn na trhu se SVR bude změna nakupování SVR pomocí výběrových řízení, kde již nebudou kontrakty vypisovány na roční bázi, ale na bázi denní, a to v co největší možné míře.** Tato změna vychází z požadavků ZEB (Clean Energy Package) a tento zmíněný přechod na denní nákup PpS (SVR) by měl být realizován od začátku roku 2020. Další změny fungování trhu se SVR v ČR přinesou plánované projekty o spolupráci provozovatelů přenosových soustav v jednotlivých zemích v EU a implementace obchodních platforem, dle požadavků **Electricity Balancing Guideline**, pro přeshraniční výměnu regulační energie – aktivaci SVR. Platformy mají umožňovat jednotlivým provozovatelům přenosových soustav vzájemnou výměnu systémové odchylky a RE. Pokud budou tyto kroky realizovány dojde k propojení trhu s RE, postupnému vyrovnání výši plateb za jednotlivé SVR a k vytvoření jednotného evropského trhu s regulační energií a také jednotné obchodní platformy tzv. European balancing market.

- **Projekt TERRE** (Trans European Replacement Reserves Exchange) – jedná se o projekt evropské platformy, který má sloužit pro výměnu regulační energie ze záloh pro náhradu (RR). Produkt RR můžeme v ČR přirovnat k produktu nakupovanému na VT. Jedná se o produkt s dobou do plné aktivace 30 minut a s maximální dobou dodávky 60 minut. Společnost ČEPS má být do platformy aktivně zapojena na přelomu roku 2019/2020. [45]

Dopady zavedení projektu TERRE:

- Zrušení vyrovnávacího trhu s regulační energií.
 - Možnost podávání volných nabídek RE bez nutnosti smlouvy o SVR.
- **Projekt MARI** (Manually Activated Reserves Initiative) – další implementační projekt evropské platformy pro výměnu RE z ručně ovládaného procesu obnovení frekvence a výkonové rovnováhy, tedy služby mFRPt. Dle EBGL musí být tato platforma zprovozněna ve všech zúčastněných zemích nejpozději do konce roku 2021. [46]

Dopady zavedení projektu MARI:

- Možnost aktivace RE z/do zahraničí. Možnost podání nabídky bez smlouvy SVR.
- Přechod z nabídkové ceny na marginální ocenění RE.
- Zkrácení doby do plné aktivace v případě mFRP₁₅ na mFRP_{12,5}.

- **Projekt PICASSO** (Platform for the International Coordination of Automated frequency restoration and Stable System Operation) – poslední implementační projekt v rámci komplexní evropské platformy pro výměnu RE. Jedná se o výměnu RE z automaticky ovládaného procesu obnovy frekvence a výkonové rovnováhy (aFRP). Dle EBGL musí provozovatelé přenosových soustav v jednotlivých zemích zavést proces optimalizace aktivace regulační energie ze služby aFRP napříč synchronně pracující soustavou. Tato platforma musí být zprovozněna ve všech zúčastněných zemích do konce roku 2021. [47]

Dopady zavedení projektu PICASSO:

- Možnost aktivace RE z/do zahraničí. Možnost podání nabídky bez smlouvy SVR.
- Přejít z nabídkové ceny na marginální ocenění RE.
- Zkrácení doby plné aktivace z 10 minut na 7,5 minuty od konce roku 2021. Poté zkrácení na 5 minut od konce roku 2025.

Jak je patrné, služby FCP se aktuálně netýká žádný z výše zmíněných implementačních projektů EU. Aktuálně již však existuje pilotní projekt ENTSO-E, který vytváří společný trh i pro službu FCP. Do tohoto projektu jsou v současnosti zařazeny provozovatelé PS ze zemí Belgie, Rakousko, Nizozemsko, Francie, Německo, Švýcarsko s blízkým rozšířením na Dánsko. Tento projekt byl spuštěn na začátku roku 2019 a pracuje na bázi denních aukcí (D-2) pro služby FCP, ve které všichni zúčastnění provozovatelé PS shromažďují obdržené nabídky na symetrickou zálohu pro FCP. Tento společný trh záloh pro službu FCP aktuálně tvoří v současnosti trh s bezmála 1400 MW této rezervy. Do budoucna je velmi pravděpodobná participace České republiky na tomto projektu a její účast na společném trhu s FCP. Dále budu předpokládat, že Česká republika se stane v budoucnu součástí určitého propojeného trhu se všemi aktuálně nabízenými SVR, který ovlivní i výše plateb za FCR.



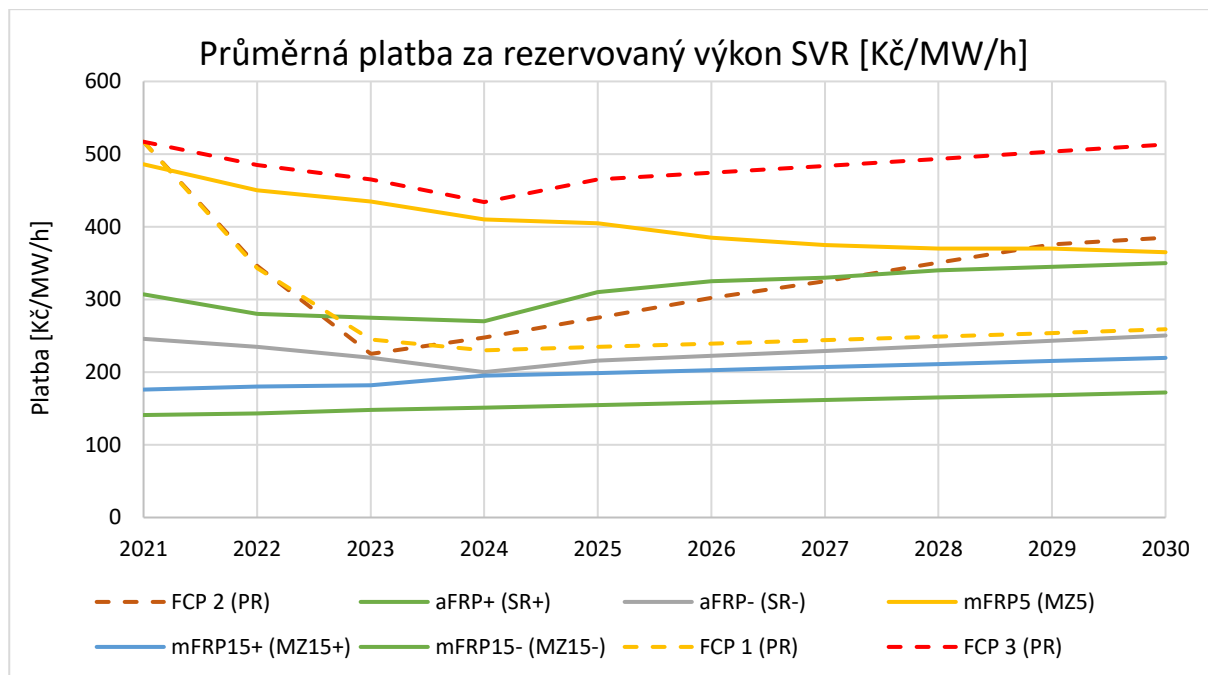
Obrázek 11 - Aktuální členové projektu FCR cooperation ENTSO-E [48]

Po implementaci výše popsaných projektů pro vytvoření propojeného evropského trhu s regulační energií, dojde ke kompletní změně trhu se SVR v ČR. Všechny provozovatelé přenosových soustav v synchronně pracující soustavě, jenž jsou zapojeny do jednotlivých projektů, budou nuceni v návaznosti na povinnost udržování co nejnižších nákladů na pořízování RE obstarávat při dostatečně velké dostupné přeshraniční kapacitě nejlevnější dostupnou regulační energii z propojeného trhu. Na základě těchto skutečností uvádím mé osobní předpoklady změn na trhu se SVR po roce 2021:

- ✓ **Snížení a sjednocení plateb za rezervované výkony jednotlivých SVR a celkové snížení nakupovaných objemů s využitím výběrových řízení.**
- ✓ **Snížení výsledné ceny regulační energie v důsledku nárůstu konkurence na nově vytvořeném evropském trhu se SVR a novým způsobem ocenění RE (marginální cena).**

Na základě těchto zjištěných skutečností a zavedených předpokladů změn na trhu se SVR v ČR provedu projekci možného vývoje cen plateb za jednotlivé SVR, která bude postavena na základě průměrných cen za rezervy výkonů SVR nakupovaných provozovateli přenosových soustav sousedních zemí, které jsou také partnery v budoucích projektech ENTSO-E. Aktuální i historické ceny jsou dostupné na portálu ENTSO-E transparency platform[49]. Možný vývoj cen SVR byl dále konzultován s vedoucím odboru Zajišťování systémových služeb společnosti ČEPS, který rovněž předpokládá v krátkodobém horizontu pokles cen za rezervované výkony SVR, a to z důvodu velkého počtu poskytovatelů a propojování trhů s PpS. Možným zvratem tohoto stavu by mohl být přelom roku 2021/2022, a to z toho důvodu, že vejdou v platnost nové emisní limity pro velká spalovací zařízení s tepelným výkonem nad 50 MW. Tyto limity jsou stanoveny referenčním dokumentem Evropského úřadu pro IPPC tzv. BREF BAT LCP, který byl vydán v roce 2017. Největší problém pro budoucí provoz těchto tepelných zařízení plynoucí z dokumentu BREF BAT je emisní limit pro vypouštění emisí rtuti do ovzduší. Přísně nastavené nové limitní hodnoty pro vypouštěné emise s sebou přináší značné investiční náklady do nových filtračních technologií, které budou vyhovovat požadovaným standardům EU. Pro mnoho tepelných zdrojů v ČR i EU jsou však investice vzhledem ke zbývajícím dobám životnosti již ekonomicky nerentabilní. Z tohoto důvodu žádají o výjimku, která může být udělena až na několik let. Po uplynutí přechodného období výjimky budou muset tato spalovací zařízení s největší pravděpodobností ukončit svůj provoz. Toto nařízení by mohlo tedy zhruba kolem roku 2024 přinést plošné ukončování mnohých provozů těchto velkých spalovacích zařízení, a tedy i snížení počtu tradičních subjektů, které poskytují SVR. Tímto by mohly zase naopak ceny rezervovaných výkonů pro jednotlivé služby SVR v budoucnu opět vzrůst. Naopak vůči tomuto nárůstu cen za rezervované výkony, a to zejména v oblasti poskytování služeb **FCP** a **mFRP₅**, by mohl v budoucnu stát dostatečně velký rozvoj bateriových úložišť participujících na službách výkonové rovnováhy. Největší možné změny cen předpokládám u FCR. Z tohoto důvodu u tohoto vývoje vynesu celkem tři možné budoucí scénáře. K vytvoření průběhu jsem využil analýzu vývoje cen rezerv služby FCP ve zmíněném projektu FCR cooperation (viz **Příloha č.2**), který tvoří největší trh s touto službou v Evropě. Dále budu u služby mFRP₅ také uvažovat mírný pokles

cen během let. U ostatních služeb již do budoucna žádný výrazný pokles plateb uvažovat nebudu, a to z důvodu, jelikož jsou aktuálně ceny rezerv pro tyto služby např. v sousedním Německu, Rakousku téměř na stejné úrovni. Navíc se nepředpokládá velký zásah bateriových úložišť do této oblasti v blízkých letech. U služby aFRP dojde také ke zkrácení doby aktivace, která by mohla ovlivnit počet subjektů poskytující zálohu pro tuto službu. Z těchto důvodů budu uvažovat s mírným nárůstem cen po roce 2024.



Graf 23 - Predikce možného budoucího vývoje průměrných plateb za rezervy SVR

Jak je patrné pro vývoj výše plateb za poskytnuté rezervy služby FCP jsem vytvořil tři možné scénáře, které budou záviset zejména na rozvoji bateriových úložišť v ČR a počtu subjektů poskytujících SVR.

- FCP 1 předpoklady: optimální nárůst BSAE participujícího na službě FCP, zvládnutí legislativních překážek, vyrovnání cen skrze evropskou platformu SVR,
- FCP 2 předpoklady: dostatečný nárůst BSAE na území ČR, mírný nedostatek poskytovatelů po roce 2024,
- FCP 3 předpoklady: nízký nárůst BSAE v ČR, vysoký nedostatek poskytovatelů po roce 2024.

6.2.3. Analýza příjmů z ostatních aplikací BESS

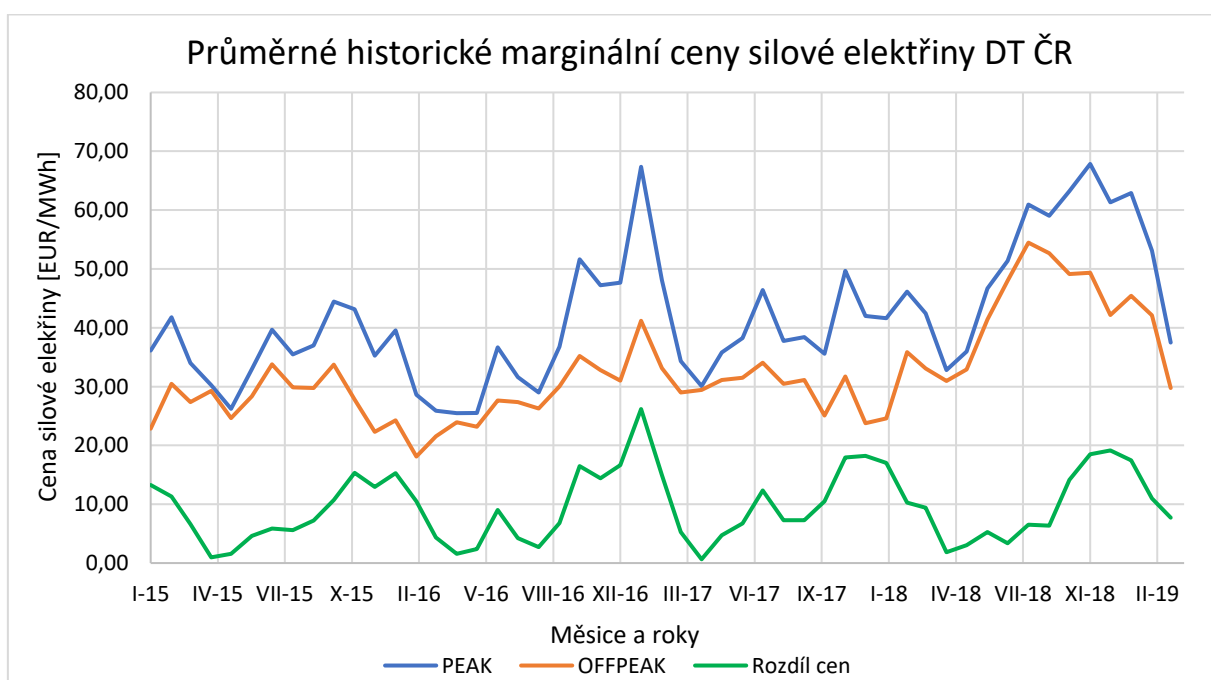
V kapitole 5. *Oblasti využití sekundárních baterií* byly identifikovány i další možné aplikace využití BESS než poskytování SVR. Pro budoucí volbu ekonomicky nejvhodnějšího využití bateriového systému akumulace je zapotřebí analyzovat možné budoucí příjmy či úspory i z provozu těchto zbývajících aplikací. Jednou z oblastí možného využití BESS byla jejich aplikace v průmyslových podnicích, které jsou připojené do distribuční sítě na hladině VN či VVN za účelem snížení maximální

rezervované kapacity, kterou mohou v daném měsíci odebrat. Na tabulce níže jsou uvedeny výše plateb za rezervované kapacity dle napěťových hladin. [50]

Tabulka 12 - Platby za rezervované kapacity na napěťových hladinách VN a VVN v ČR

Provozovatel DS	Úroveň napětí	Měsíční cena ze roční rezervovanou kapacitu [Kč/MW]	Měsíční cena ze měsíční rezervovanou kapacitu [Kč/MW]
ČEZ Distribuce, a.s.	VVN	69 166	77 467
	VN	165 973	185 891
E.ON Distribuce, a.s.	VVN	51 150	57 649
	VN	118 696	133 777
PREdistribuce, a.s.	VVN	69 760	77 191
	VN	170 116	188 237

Při nesprávně nastavené rezervované kapacitě může docházet buď k jejímu překročení k tzv. překročení čtvrt hodinového maxima nebo ke zbytečnému předimenzování a k vysokým platbám za rezervovanou kapacitu. Vhodným řízením aktuální spotřeby ve spojení s BESS může odběratel těmto platbám za překročení maxima předejít. Překročení RK je sankcionováno dle cenového rozhodnutí ERU následovně: „Cena za překročení rezervované kapacity v kalendářním měsíci je rovna čtyřnásobku pevné ceny za rezervovanou kapacitu vztahenou na každý MW nejvyššího překročení smluvené maximální hodnoty čtvrt hodinového elektrického výkonu.“ [51] Další aplikace BESS, z nichž mohou přímo plynout úspory či příjmy pro obchodníky s elektřinou či velkoobdoběratele elektrické energie, jsou funkce **load shifting**, **peak shaving** a **cenová arbitráž elektrické energie**. Provozovatelé těchto BESS budou operovat nejčastěji s cenami silové elektřiny během dne. Z tohoto důvodu provedu analýzu rozdílů cen elektřiny v časech špičkového zatížení tzv. PEAK Loadu a mimo něj v časech tzv. OFFPEAK Loadu.



Graf 24 - Historické průměrné marginální ceny silové elektřiny na DT v ČR

6.3. Zhodnocení vhodnosti BESS pro jednotlivé aplikace

Na základě zjištění z předešlých analýz provedu posouzení jednotlivých možných aplikací BESS a případná doporučení nejvhodnější technologie bateriových článků. Následující tabulka již počítá s předchozími předpoklady, a to zejména s překonáním legislativních překážek pro provozování stand-alone akumulace.

Tabulka 13 - Zhodnocení možností využití BESS

Využití BESS	Výhody	Nevýhody	Doporučená tech.	Poznámka
FCP	<ul style="list-style-type: none"> - ověřená aplikace Li-ion BESS - mělké cykly vybíjení - oscilace kolem 50 % SoC - dlouhá doba životnosti - nižší instalovaná kapacita BESS - nižší prvotní investice - bezpečný provoz BESS 	<ul style="list-style-type: none"> - bez plateb za RE - budoucí vysoká konkurence - snižování plateb za FCR - možnost nevyhrání VŘ 	<p>NMC</p> <p>NCA</p>	<ul style="list-style-type: none"> - nejvhodnější aplikace pro využití vyřazených baterií - z principu funkce FCP nevzniká omezení na využívání bat. článků se zvýšeným Ri - možnost využití levnějších technologií bateriových článků a z toho plynoucí investiční úspory
aFRP	<ul style="list-style-type: none"> - platba za dodanou RE - možnost volby aFRP- nebo aFRP+ - předpoklad konstantní výše platby za aFRR 	<ul style="list-style-type: none"> - hluboké DoD baterie - vysoké vybíjecí výkony - vysoké instalované kapacity - vyšší investiční náklady - vysoké nároky na thermal management baterie 	<p>LFP</p> <p>LMO</p> <p>omezeně NMC</p>	<ul style="list-style-type: none"> - nevhodné využití vyřazených baterií vzhledem vysokým výkonům a hrozbě přehřívání baterie z důvodu zvýšeného Ri - jako stand-alone téměř nerealizovatelné - v budoucnu možnost agregace více BESS
mFRPt	<ul style="list-style-type: none"> - krátká doba aktivace výkonu BESS - vyšší životnost baterie - rozšíření portfolia nabízených služeb přidruženého zdroje - vyšší platba za dodanou RE 	<ul style="list-style-type: none"> - nutnost přidružení u konvenčního zdroje - vyšší instalovaná kapacita - vyšší investiční náklady - zpočátku vyšší vybíjecí výkony 	<p>LFP</p> <p>LMO</p>	<ul style="list-style-type: none"> - jako stand-alone BESS nemožné z důvodu požadavku na aktivaci 4 hodiny - uplatnění spíše u mFRP5 kde je požadován krátký čas změny výkonu - nepřiliš častá aktivace
nabíjení xEV	<ul style="list-style-type: none"> - odložení investice do DS - zmírnění nárazových proudů na síť - podpora integrace elektromobility - možnost kombinace s OZE - využívání cenové arbitráže 	<ul style="list-style-type: none"> - vysoké vybíjecí výkony - hluboké DoD baterie - náročné na bezpečnost provozu a thermal management - extrémně krátká doba životnosti 	<p>LFP</p> <p>omezeně LMO (nízká životnost)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - pro budoucí integraci elektromobility ve městech dle plánů NAP SG je využívání BESS pro nabíjení xEV nutné - pro vyřazené baterie nevhodné využití (krátká životnost, nárůst Ri, zahřívání)

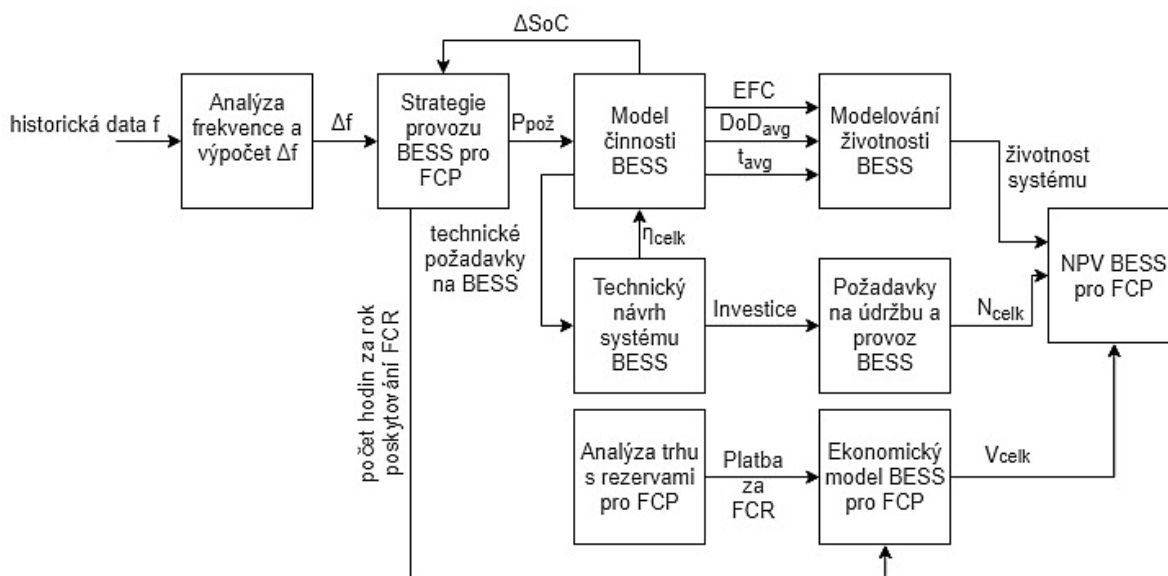
Využití BESS	Výhody	Nevýhody	Doporučená tech.	Poznámka
BESS+OZE	<ul style="list-style-type: none"> - zvyšování efektivity výroby OZE - možnost částečně řídit výrobu - obchodování s elektřinou v čase - bez nárazových výkonů - u FVE VN a VVN možnost SRUQ 	<ul style="list-style-type: none"> - hluboké DoD baterie - vyšší instalovaná kapacita - vyšší investiční náklady - provoz při vysokém či nízkém SoC - nižší doba životnosti 	<ul style="list-style-type: none"> NMC LFP 	<ul style="list-style-type: none"> - spojení BESS a FVE by mohlo být v budoucnu využito pro službu SRUQ, která je sama o sobě velice náročná na střídač el. energie, kterým však FVE na úrovni VN a VVN již disponují, platba za dodané MVarh
BESS velkoodběratel ,obchodník s elektřinou	<ul style="list-style-type: none"> - široké portfolio využití BESS - balancování ceny silové elektřiny - nahrazení dieselgenerátoru - kompenzace účinníku - předcházení sankcí 	<ul style="list-style-type: none"> - stále poměrně drahá technologie - závislost na vývoji DT s el. Energií - náročné na řízení BESS a podniku jako celku pro efektivní využití - spíše doplňková technologie 	<ul style="list-style-type: none"> NMC NCA LFP LMO (dle využití) 	<ul style="list-style-type: none"> - vhodné zejména pro kritickou infrastrukturu v podobě záložního zdroje a schopnosti ostrovního provozu - v budoucnu předpoklad spojení s OZE u průmyslových podniků

Z analýzy, jejíž zhodnocení je stručně uvedeno v předchozí tabulce, je patrné, že za aktuální situace **jsou velké bateriové systémy vhodné pro využití v nejrychlejších službách výkonové rovnováhy**. Z poskytování služby FCP bateriovou akumulací plyne nespočet výhod, které dělají tuto službu pro aktuální lithiové technologie bateriových článků naprosto ideální. Při využívání BESS pro poskytování rezerv právě pro službu procesu automatické regulace frekvence je její provoz k baterii šetrný a můžeme zde dosahovat velmi dlouhých dob životností, což je vzhledem k ceně systémů žádoucí. Jelikož si myslím, že stabilita chodu přenosové sítě je do budoucna pro rozvoj moderní energetiky, která bude složena z nezanedbatelné části z obnovitelných intermitentních zdrojů, naprosto zásadním faktorem a je zajišťována právě klíčovou funkcí regulace frekvence. Z tohoto důvodu se v následujících kapitolách zaměřím na návrh bateriového systému pro poskytování služby FCP a optimalizace bateriové strategie pro nejefektivnější provoz akumulace.

Aby závěrem této kapitoly nebyl výrok, že bateriová úložiště jsou vhodná právě a jen pro FCP, je nutno dodat, že bateriové systémy akumulace najdou v nejbližší budoucnosti uplatnění ve všech oblastech moderní energetiky, a to jak ve výrobě, přenosu a distribuci, tak i na straně spotřeby či obchodu. Dalším faktorem, který bude hrát v rozvoji plošného nasazování bateriových systémů, budou nároky na zkracování časů aktivací jednotlivých SVR, které plynou z projektů pro vytvoření sjednoceného energetického trhu se zálohami pro SVR. V tomto případě budou BESS fungovat jako podpora klasických zdrojů při požadovaných změnách. **Dle aktuálního dění na německém trhu se zálohami pro SVR a závěrů plynoucí ze ZEB, je zapotřebí zmínit, že budoucnost akumulace není dle všech náznaků pouze ve výstavbě enormních velkokapacitních úložišť, ale ve funkci agregace velkého počtu malých bateriových úložišť ve velkou virtuální akumulaci, která již svými parametry bude schopna konkurovat i klasickým zdrojům při poskytování jednotlivých služeb.**

7. Bateriový systém pro poskytování služby FCP

Pro jasnou představu zvolené metodiky vyhotovení komplexního modelu BESS určeného pro poskytování rezervy výkonu pro proces automatické regulace frekvence, jsem sestrojil následující diagram, který zjednodušeně zobrazuje postup, který bude využit v této praktické části diplomové práce.



Obrázek 12 - Znárodnění metodiky vypracování komplexního modelu BESS pro poskytování FCR

Během vyhotovení jednotlivých částí modelu budou také vždy uvedeny jednotlivé předpoklady, jež byly aplikovány pro správnou funkčnost modelu a maximalizaci reálnosti provozu BESS pro poskytování této SVR.

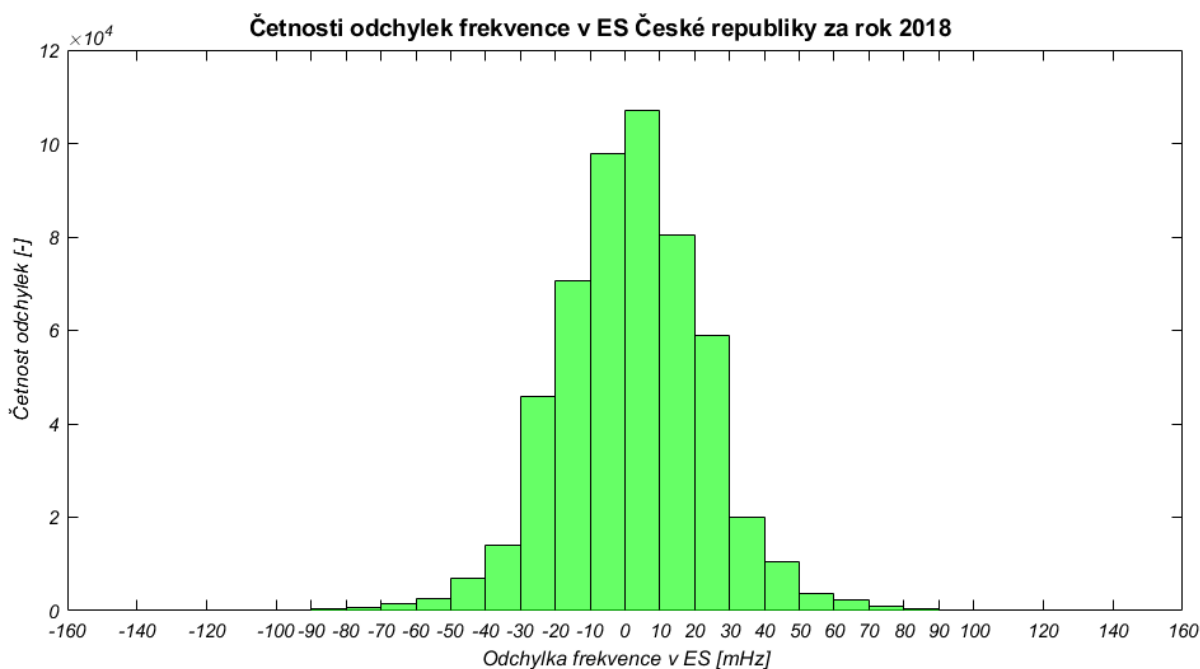
7.1. Matematický model provozu BESS

V této podkapitole provedu návrh matematického modelu bateriového úložiště, jenž se bude podílet na poskytování SVR, jmenovitě na službě FCP. Model bude založen na analýze a rozboru historických dat průběhů frekvence v ES České republiky a dále na požadavcích pro participaci BESS na poskytování FCP v sousedním Německu, kde je již využívání BESS v tomto odvětví standardem. Dále bude součástí této podkapitoly návrh a aplikace vhodné strategie provozu bateriového úložiště, aby bylo docíleno co nejvyššího stupně zabezpečení dodávky nasmlouvaných rezerv pro FCP během roku a tím bylo docíleno maximalizace ekonomiky provozu BESS.

7.1.1. Analýza historických dat frekvence sítě

Následující analyzovaná data byla získána od společnosti ČEPS a.s. a odečtena z jejich výročních zpráv o provozu ES, která jsou dostupná na oficiálních stránkách společnosti ČEPS. Frekvence v ES ČR se pohybuje během roku kolem hodnoty 50 Hz a měla by pro zajištění stability a bezpečnosti provozu ES

udržována v intervalu ± 200 mHz kolem bazového bodu. Skrze tuto analýzu získám základní představu o průběhu aktivace služby FCP. Dále bude naprosto klíčové zjistit průměrné časy aktivace rezerv FCR a jejich průměrné poměrné výše během aktivací, a to z důvodu omezené kapacity BESS, které bude instalováno jako **samostatně stojící zařízení**. V tomto případě se tedy bude jednat o stand-alone bateriový systém a po vyčerpání své kapacity nebude dostupný žádný jiný zdroj pro přebrání funkce FCP. Jelikož nás pro budoucí matematický model bude zajímat pouze odchylka frekvence pohybující se kolem 50 Hz v rámci intervalu ± 200 mHz, provedu pouze analýzu těchto odchylek během let.



Graf 25 - Rozložení četností odchylek frekvence v ES za rok 2018

Z grafu 24 je patrné, že výsledné rozložení odchylek nebylo během roku 2018 symetrické. Stejně tomu bylo i v letech 2013 až 2017. Z tohoto poznatku plyne závěrem to, že bateriový systém bude nucen během roku dodat více buď kladné nebo záporné “regulační“ energie, což vzhledem k omezeným kapacitám bateriových systémů bude znamenat zvýšené nároky na návrh optimální strategie provozu. Na základě této myšlenky provedu analýzu extrémů odchylek, které během jednotlivých let nastaly a dále analýzu časů, během kterých by bylo dle aktuálního principu FCP požadováno dodání kladné či záporné energie do ES.

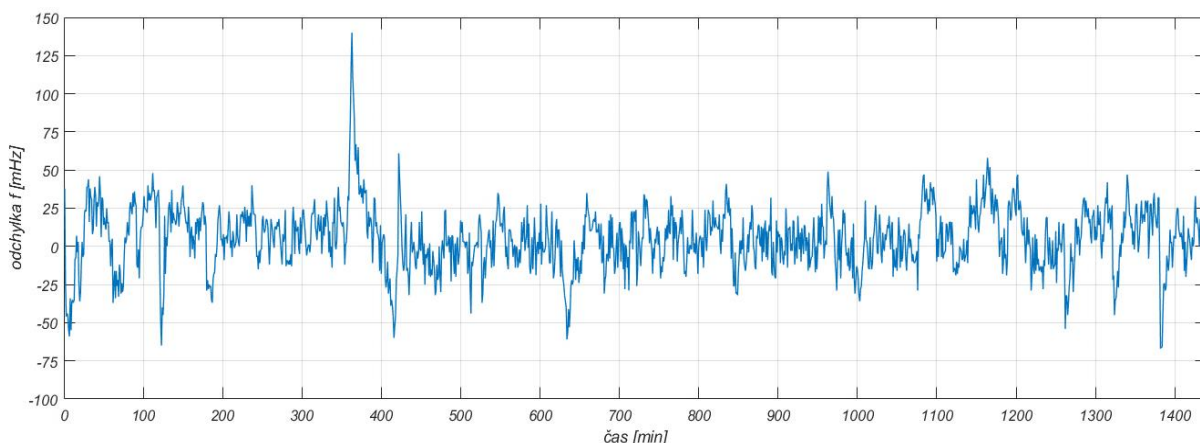
Tabulka 14 - Základní analýza historických dat průběhu f v ES

rok	min Δf [mHz]	max Δf [mHz]	$\Delta f > 0$ [min/rok]	$\Delta f < 0$ [min/rok]
2013	-135	139	271 920	246 286
2014	-125	128	274 313	243 348
2015	-147	126	276 615	241 091
2016	-127	125	277 660	241 525
2017	-133	133	277 857	240 694
2018	-155	140	277 314	240 945

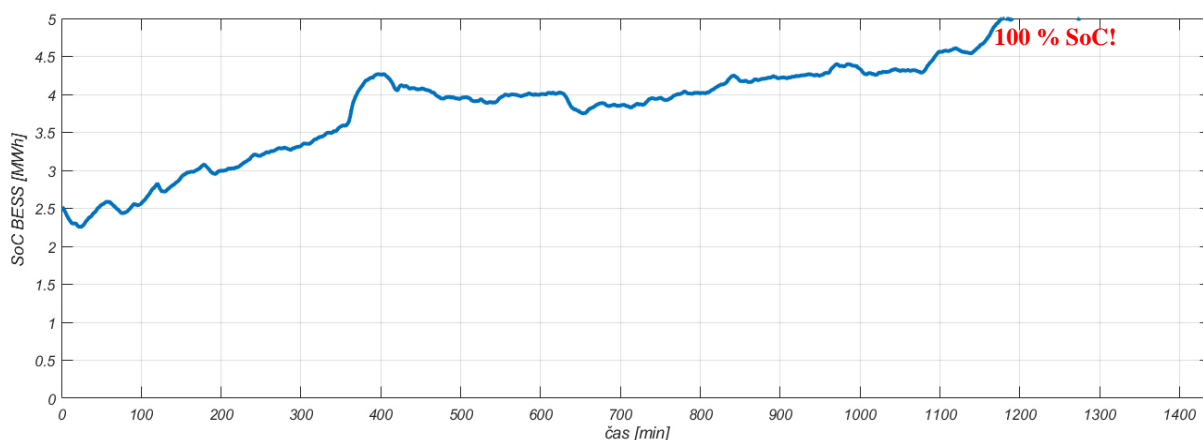
Z tabulky 14 lze konstatovat, že rozložení odchylek frekvence v ES během jednotlivých let je téměř totožné pro všechny analyzované roky. Z principu funkce FCP (Graf 16), kdy při záporné odchylce frekvence je třeba dodávat kladnou “regulační“ energii do sítě, a naopak můžeme tvrdit, že bude nutno více času energie během let ze sítě odebírat, tedy dodávat zápornou “regulační“ energii, což ve spojení s využitím bateriové akumulace bude znamenat, že bude bateriový systém častěji nabíjen. Toto tvrzení však neznamená, že výsledný profil SoC bateriového systému bude častěji na vyšších úrovních nabití, jelikož nebylo zatím analyzováno o jak velké kladné či záporné odchylky frekvence se jedná. Pro přiblížení představy toho, jak by mohl v reálném provozu vypadat průběh SoC bateriového systému již aktivně se podílejícího na regulaci frekvence v síti, jsem vytvořil jednoduchý matematický model v programu MATLAB, který reprezentuje aktivace FCP BESS během dnů maximální kladné a záporné odchylky f v roce 2018. Model byl vytvořen na základě následujících vstupních předpokladů:

- aplikace BESS s kapacitou $C_{jmen}=5$ MWh a $P_{max}=5$ MW,
- počáteční stav kapacity $C_{start}=0,5 \cdot C_{jmen}$,
- bez aktivace pásma necitlivosti (aktuálně se v ČR pro FCP nevyužívá).

Následující grafy zobrazují průběh odchylky frekvence a průběh SoC BESS ve dni maximální kladné odchylky v roce 2018, která nastala dne 20.6.2018.



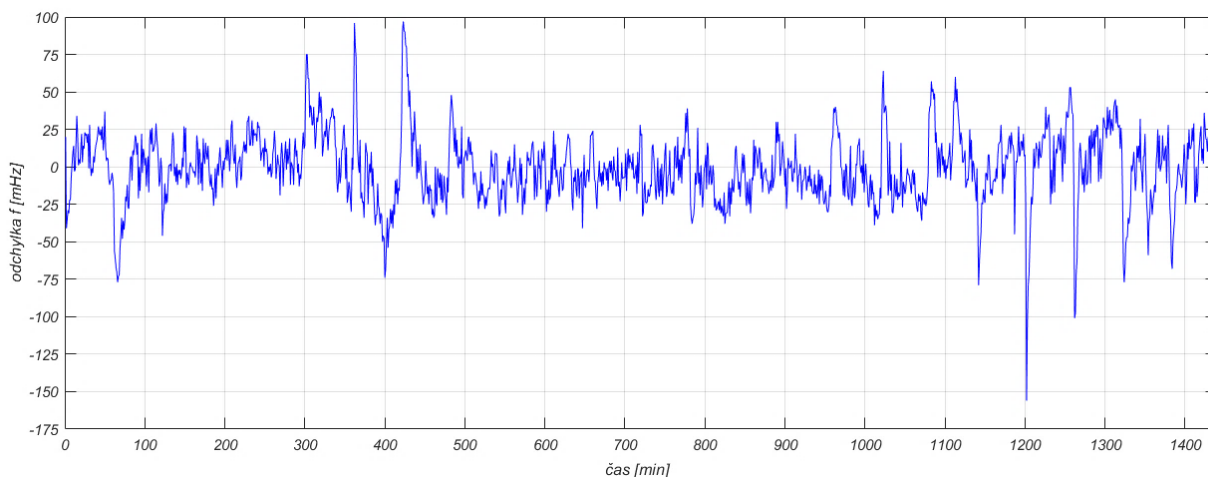
Graf 26 - Průběh frekvence během dne maximální kladné odchylky v roce 2018



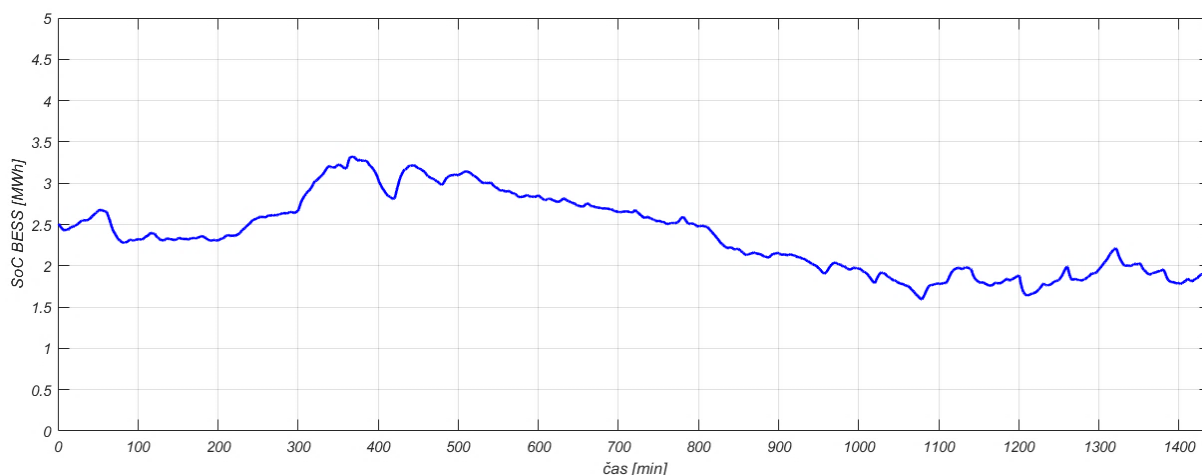
Graf 27 - Průběh SoC BESS v návaznosti na aktivace služby FCP během dne maximální kladné odchylky v roce 2018

Jak je patrné, tak v případě, že aplikujeme aktuální princip automatické lineární aktivace FCP bez využití pásma necitlivosti na provoz BESS, dojde okolo 20. hodiny k dosažení maximální úrovně nabití

a baterie již nebude dále schopna poskytovat službu FCP v **případě pokračování kladné odchylky frekvence v síti**. Je tedy patrné, že aktuální nastavení aktivace FCP je pro využití bateriové akumulace celkově nevhodné a nelze tak spoléhat na fakt, že odchylka dlouhodobě osciluje kolem bazového bodu 50 Hz. Nyní provedu pro porovnání analýzu vlivu aktivace služby FCP na SoC bateriové akumulace během dne s maximální zápornou odchylkou frekvence, která nastala dne 6.2.2018.



Graf 28 - Průběh frekvence během dne maximální záporné odchylky v roce 2018



Graf 29 - Průběh SoC BESS v návaznosti na aktivace služby FCP během dne maximální záporné odchylky v roce 2018

Z předešlých grafů je patrné, že ve dne maximální záporné odchylky je průběh odchylky pro výsledný provoz BESS při participaci na službě FCP téměř ideální, i když by se to na první pohled nemuselo zdát. Naopak ve dne maximální kladné odchylky převládají časy, kdy se odchylky pohybuje v kladných hodnotách a výsledný stav nabití bateriového systému bude tedy stále stoupat.

Tabulka 15 - Porovnání dnů maxim odchylek frekvence v roce 2018

den	$\Delta f > 0$ [min/den]	$\Delta f < 0$ [min/den]
20.06.2018 - max. kladná Δf	881	534
06.02.2018 - max. záporná Δf	671	746

Z tohoto důvodu nelze tvrdit, že lze strategii provozu BESS při participaci na SVR založit pouze na předpokladu oscilace odchylek, a tudíž i výkonů baterií, které budou ve výsledku zhruba vyrovnané. Je

proto nutné zajistit, aby byl provoz BESS co nejvíce optimalizován a byl zde dostatečně velký prostor pro obnovu a řízení úrovně SoC BESS.

7.1.2. Strategie a podmínky provozu BESS pro FCP

V předešlé kapitole jsem došel skrze základní simulaci provozu BESS při poskytování FCP k závěru, že za aktuálně nastavených podmínek poskytování služby FCP není provoz BESS vždy optimální a mohlo by docházet ke kritickým situacím, kdy by akumulace nebyla připravena k dalšímu poskytování nasmlouvaných rezerv pro službu FCP, což by mohlo negativně ovlivnit stabilitu celé soustavy. Proto se nyní na základě předpokladu, že se ČR stane součástí evropského trhu se SVR a projektu FCR cooperation, který byl stanoven v kapitole 6.2.2. *Trh s PpS*, zaměřím na podmínky pro bateriová úložiště při poskytování služby regulace frekvence v sousedním Německu. V Německu jsou aktuálně celkem 4 operátoři přenosových soustav, kteří nakupují jednotlivé objemy SVR na týdenní bázi prostřednictvím online platformy REGELLEISTUNG. V Německu jsou rezervy pro službu FCP nakupovány pod názvem PCR, a jelikož velký počet poskytovatelů jsou již právě bateriová úložiště, jsou zde stanoveny i zvláštní požadavky a výjimky na poskytování rezerv během doby trvání poskytnutí rezerv. Na následující tabulce jsou uvedeny základní požadavky pro participaci BESS na poskytování rezerv pro službu PCR.

Tabulka 16 - Požadavky poskytování PCR v Německu [52]

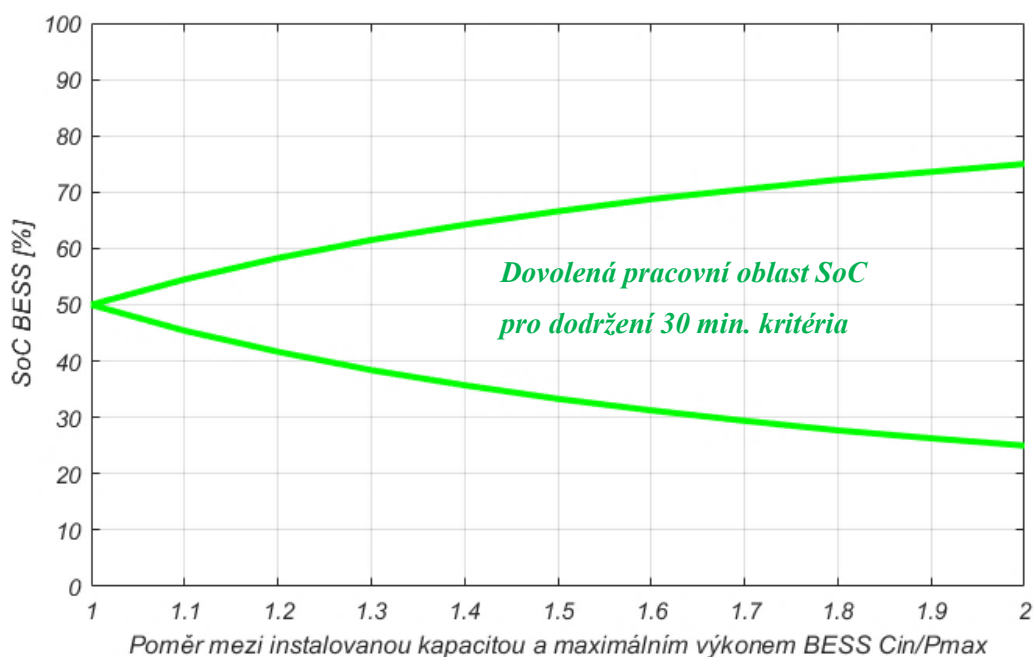
Požadavky na poskytování PCR (FCP) pro BESS v Německu	
Maximální pásmo necitlivosti	± 10 mHz
Plná aktivace výše rezervy při odchylce	± 200 mHz
Maximální doba do plné aktivace rezervy	30 s
<i>Dostupnost rezerv během normálního stavu Δf</i>	100 %
<i>Doba pro obnovení SoC BESS po nastání kritického stavu Δf</i>	120 min
Minimální čas aktivace 100% výkonu samostatně stojící	30 min
Minimální čas aktivace 100% výkonu přidružený u zdroje	15 min

Z tabulky 16 je patrné, že základní požadavky na poskytování rezerv pro službu PCR jsou v Německu totožné jako pro službu FCP v ČR. V tabulce se objevuje nový pojem, který není v Kodexu PS ČEPS dosud definován při poskytování této služby, a tím je **normální stav odchylky frekvence**. Tento pojem bude do budoucna důležitý, jelikož během tohoto stavu musí být BESS schopen v jakémkoliv okamžiku dodat plný regulační výkon (jak záporný, tak kladný) po dobu minimálně 30 minut. Normální stav odchylky frekvence končí, je-li indikován alespoň jeden z následujících kritických stavů odchylky frekvence v ES[52]:

- odchylka frekvence v ES $\Delta f > \pm 50$ mHz déle než 15 minut,
- odchylka frekvence v ES $\Delta f > \pm 100$ mHz déle než 5 minut,
- odchylka frekvence v ES $\Delta f > \pm 200$ mHz kdykoliv po jakkoliv dlouhou dobu.

V případě, že nastane některá z těchto situací, musí být baterie schopna aktivace v požadované výši výkonu, zpravidla P_{\max} , v obou směrech po dobu nejméně 30 minut v případě samostatně stojící BESS.

Po obnovení normálního stavu odchylky frekvence v ES má BESS maximálně 120 minut na obnovení SoC na takovou úroveň, aby opět byla schopna dostát kritériím na požadavek aktivace v plné výši. Během této doby však může BESS stále poskytovat FCP, pokud se odchylka frekvence nachází v normálním stavu. Vzhledem k požadavkům na obnovu SoC BESS a schopnost během normálního stavu odchylky frekvence dodat plný výkon minimálně po dobu 30 minut se dostáváme k určité úvaze o dovolené pracovní oblasti SoC bateriové akumulace. Tato dovolená pracovní oblast může být stanovena buď nastavením hodnoty C-rate BESS či poměrem mezi instalovanou kapacitou a nasmlouvaným maximálním výkonem pro FCP. V kapitole 6.3. *Zhodnocení vhodnosti BESS pro jednotlivé aplikace* jsem došel k závěru, že **nejvhodnější chemie vyřazených bateriových článků pro poskytování služby FCP jsou chemie NCA a NMC**. V dřívější analýze parametrů bateriových článků bylo zjištěno, že tyto chemie sekundárních bateriových článků jsou náchylné na vybíjecí a nabíjecí výkony, a proto je pro jejich optimální provoz nejlepší nepřekračovat během provozu $C_{rate} = 1$. Z tohoto důvodu provedu grafické vyobrazení dovolené pracovní oblasti SoC BESS v závislosti na poměru instalované kapacity a nasmlouvaného maximálního výkonu (výše rezervy) při konstantní hodnotě $C_{rate} = 1$ pro FCP.



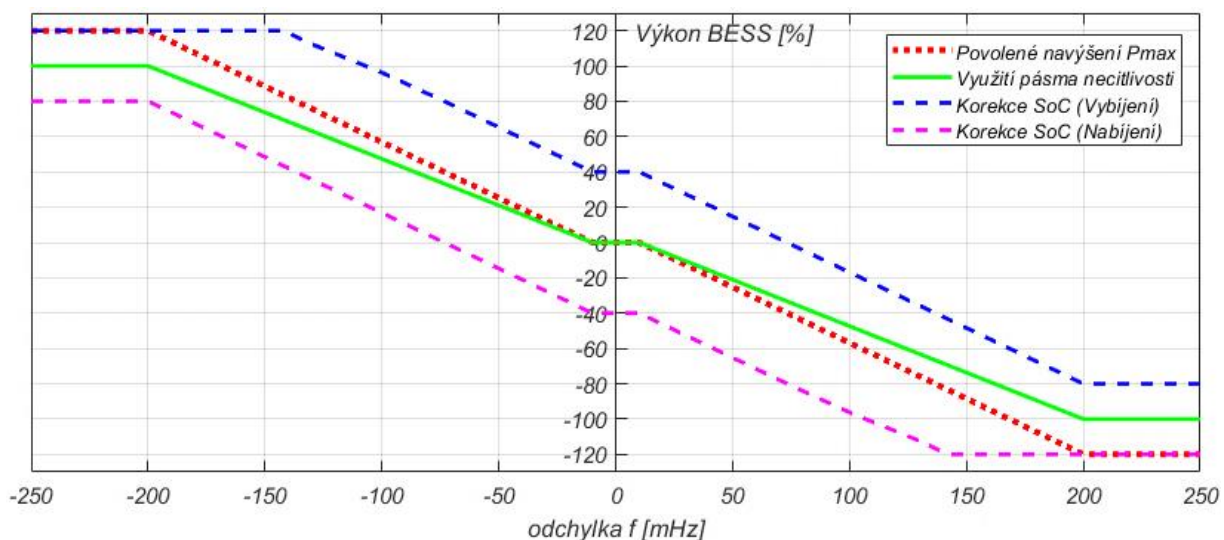
Graf 30 - Dovolená pracovní oblast SoC BESS při PCR v Německu

Tento graf nám vymezuje oblast, ve které bychom se měli snažit udržovat SoC bateriového systému během normálního stavu odchylky frekvence v ES. Pro udržování správné úrovně nabití BESS mají provozovatelé těchto akumulací dle podmínek provozovatelů PS v Německu několik následujících nástrojů pro korekci SoC v reálném čase, a to [53]:

1. **Využití pásma necitlivosti aktivace FCP pro balancování SoC** – balancování SoC, tedy nabíjení či vybíjení BESS je v pásmu necitlivosti povoleno, pokud není tato činnost kontraproduktivní a nevyvolává negativní nárůst odchylky frekvence. Korekce musí započít, pokud se odchylka

frekvence dostane do pásma ± 10 mHz a musí přestat okamžitě, jakmile se odchylka frekvence dostane nad úroveň ± 10 mHz.

2. **Dovolené překročení maximálního výkonu** – kdykoliv během provozu BESS je povoleno překročení aktuálního výkonu, který je požadován dle principu funkce FCP a velikosti odchylky frekvence v síti, a to až o 20 %. Tento stupeň volnosti je povolen jak pro kladný, tak záporný výkon, který je akumulací dodáván do sítě. Výkon systému se může tedy pohybovat na jakékoliv hodnotě v intervalu mezi 100 % a 120 % požadovaného výkonu.
3. **Korekce SoC (Correction of SoC)** – využití této metody nastává většinou po dodržení 30minutového kritéria, kdy BESS dodávala svůj plný výkon a její SoC je buď na kriticky nízké či vysoké úrovni. Korektivní energii si BESS bude moci zajišťovat například obchodováním na trhu s elektrickou energií, využitím záloh RR v rámci projektu TERRE či uzavřením bilaterální dohody s vhodnou protistranou. Během lhůty pro obnovení SoC do povolené pracovní oblasti (120 minut) bateriové úložiště stále může poskytovat část výkonu pro FCP. Z tohoto principu musí být jednotlivé energetické toky technicky odděleny a BESS musí být pro tuto variantu technicky přizpůsobena.

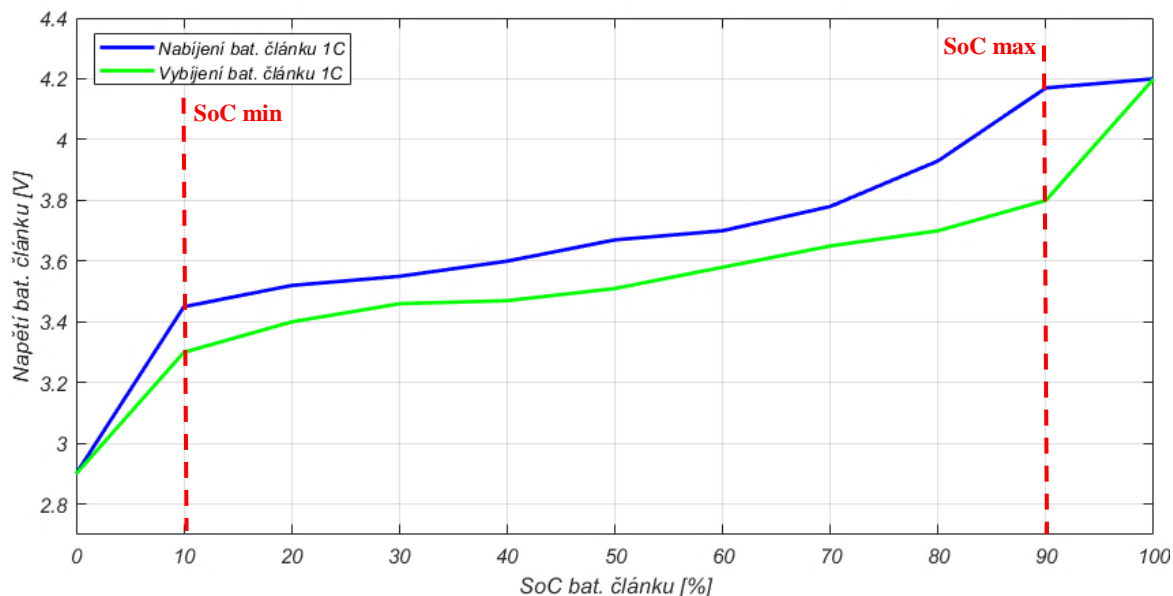


Graf 31 - Povolené strategie při participaci BESS během poskytování PCR (FCR) v Německu

Na výše zobrazeném grafu jsou graficky interpretovány všechny povolené strategie, které mohou být bateriovými akumulacemi využívány pro udržování SoC v povolené pracovní oblasti. **V budoucím modelu provozu BESS bude výsledná strategie navržena jako vhodná kombinace všech tří nástrojů pro balancování SoC v návaznosti na jeho aktuální hladinu a hodnotu odchylky f.**

Poslední podmínka, která bude limitní při modelování vhodné strategie provozu bude rozsah SoC BESS, který bude plně využíván. Stanovení vhodného rozsahu SoC je důležité zejména z hlediska životnosti baterie, s kterou je spjata i ekonomická efektivita aplikace. Vhodný interval, který bude využíván během poskytování FCP, stanovím na základě nabíjecí a vybíjecí charakteristiky sekundárních bateriových článků NMC a NCA a teoretických poznatků z kapitoly 4.2.2. *Degradace baterie v provozu.* Na následujícím grafu jsou vyneseny nabíjecí a vybíjecí charakteristiky NMC a NCA sekundárního

bateriového článku. Jak je patrné, tak charakteristiky mají zhruba lineární průběh v intervalu od 10 % do 90 % SoC. Provozování bateriového článku mimo tento interval by mělo negativní dopad na chemii baterie, životnost a způsobovalo by velký nárůst vnitřního odporu baterie, který by ohrožoval bezpečnost provozu. Z tohoto důvodu bude dovoleno provozovat BESS pouze od 10 % SoC do 90 % SoC.



Graf 32 - Nabíjecí a vybíjecí charakteristika NMC a NCA bateriového článku

Jak již bylo dříve zmíněno, budou jednotlivé nástroje pro obnovu a korekci SoC aktivovány v návaznosti na podmínky poskytování FCP, ale také dle aktuální hladiny nabití bateriového systému. Vzhledem ke všem zjištěným podmínkám a možnostem jsem vytvořil následující strategie balancování SoC bateriového úložiště. Vzhledem k průběhu nabíjecí a vybíjecí křivky NCA a NMC článku dojde v případě dosažení hladiny SoC 10 % a 90 % k odpojení BESS od sítě, aby se předešlo jejímu poškození či nadměrnému zkracování životnosti.



Obrázek 13 - Strategie pro řízení a korekci SoC během poskytování FCP

Jak je z předešlého schématu strategie (obrázek 13) patrné, není nutné udržovat hladinu SoC striktně na 50 %, což je i v reálném provozu téměř nemožné. Přineslo by to s sebou pouze zvýšený počet cyklů a více energie, která by prošla baterií, a tím pádem by docházelo k jejímu rychlejšímu stárnutí. Udržování hladiny SoC v uvedeném intervalu 40 % až 60 % vychází z dovolené pracovní oblasti SoC pro dodržení 30minutového kritéria při vyšším poměru C_{in}/P_{max} . Jelikož jsem však stanovil, že BESS bude odpojena při hladinách 10 % a 90 %, dojde k zúžení maximálního rozsahu SoC, a tedy i k nutnosti navýšení poměru C_{in}/P_{max} pro dodržení povolené pracovní oblasti. **Závěry a předpoklady plynoucí z této kapitoly pro modelování provozu BESS:**

- BESS bude provozován pro potřeby FCP mezi hladinami 10 % a 90 %, při překročení těchto hodnot bude BESS od ES odpojena.
- BESS nebude poskytovat FCP uvnitř pásma necitlivosti (DB) ± 10 mHz.
- BESS bude disponovat poměrem $C_{in}/P_{max} = 1,6$ pro dodržení 30minutového kritéria.
- Strategie pro korekci a balancování SoC bude využívat všechny povolené nástroje.
- Pro optimální životnost baterie nebude využíván C_{rate} větší než 1.
- Baterie bude složena z NCA či NMC bateriových článků.

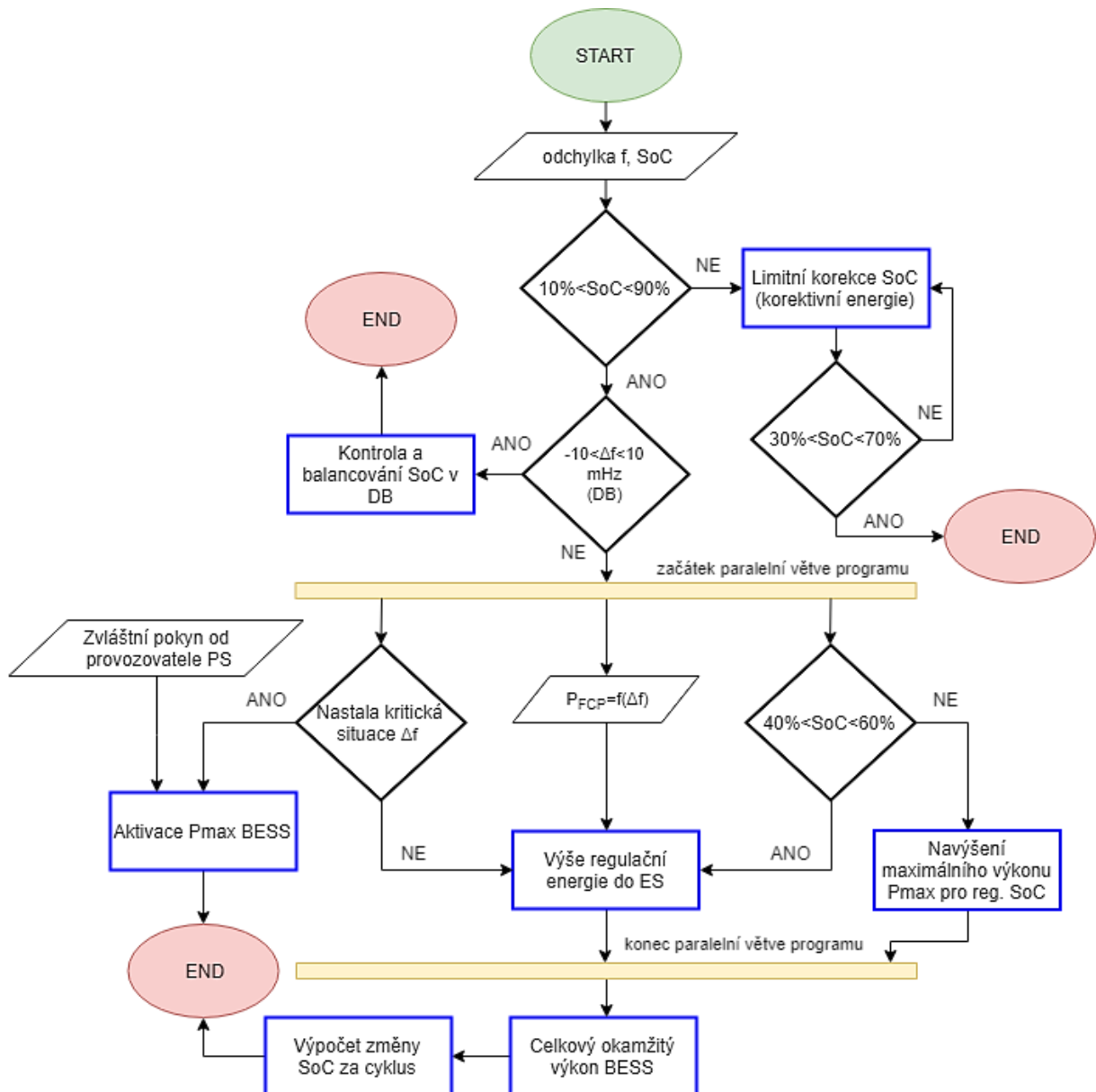
Použitím předpokladu, že se BESS nebude během pásma necitlivosti podílet na poskytování FCP, dojde ke změně výsledného času aktivace BESS během roku, což je patrné z Graf 25 - Rozložení četnosti odchylek frekvence v ES za rok 2018. V následující tabulce jsem proto vytvořil analýzu dat, a tedy i časů, kdy bude FCP aktivováno během jednotlivých roků. Tato data již budou využita v matematickém modelu a počítají aktivaci pásma necitlivosti. Jak je patrné každý rok je zhruba 40 % času během roku možno využít pro balancování SoC během pásma necitlivosti. Dále nečinností v tomto pásmu šetří bateriové úložiště “regulační“ energii, kterou musela dodávat v mém prvním modelu funkce v předchozí kapitole 7.1.1. Analýza historických dat frekvence sítě.

Tabulka 17 - Analyzovaná historická data při úvaze aktivace pásma necitlivosti

rok	$\Delta f > -10$ mHz [min/rok]	$\Delta f > 10$ mHz [min/rok]	$\Delta f = DB$ [min/rok]
2013	147 960	28%	175 392
2014	140 169	27%	171 434
2015	137 403	26%	171 986
2016	137 750	26%	172 711
2017	144 342	27%	179 413
2018	143 014	27%	177 494

7.1.3. Roční matematický model provozu BESS

Pro simulaci reálného provozu BESS při poskytování procesu automatické regulace frekvence jsem využil prostředí programu MATLAB. V tomto integrovaném prostředí jsem vytvořil program, který simuluje provoz bateriového úložiště, jeho výstupy a vstupy jsou graficky interpretovány. Základní struktura programu je znázorněna na níže uvedeném vývojovém diagramu. Kompletní zdrojový kód vytvořeného programu je k nahlédnutí v hlavní příloze této práce.



Obrázek 14 - Vývojový diagram modelu provozu BESS při FCP

Program modelu provozu jsem vytvořil jako obecný model, který pracuje s poměrnými veličinami a proměnnými, aby bylo možno jednoduše zadávat či měnit důležité technické parametry využití bateriové akumulace jako např. počáteční kapacita, vybíjecí a nabíjecí C_{rate} či maximální povolený výkon BESS. Možnost měnit tyto parametry může být v budoucnu využita pro porovnání ekonomické

efektivnosti provozu dle velikosti využití akumulace či pro vytvoření citlivostních analýz. V následující tabulce jsou definovány vstupní proměnné matematického modelu, které lze v případě nutnosti měnit.

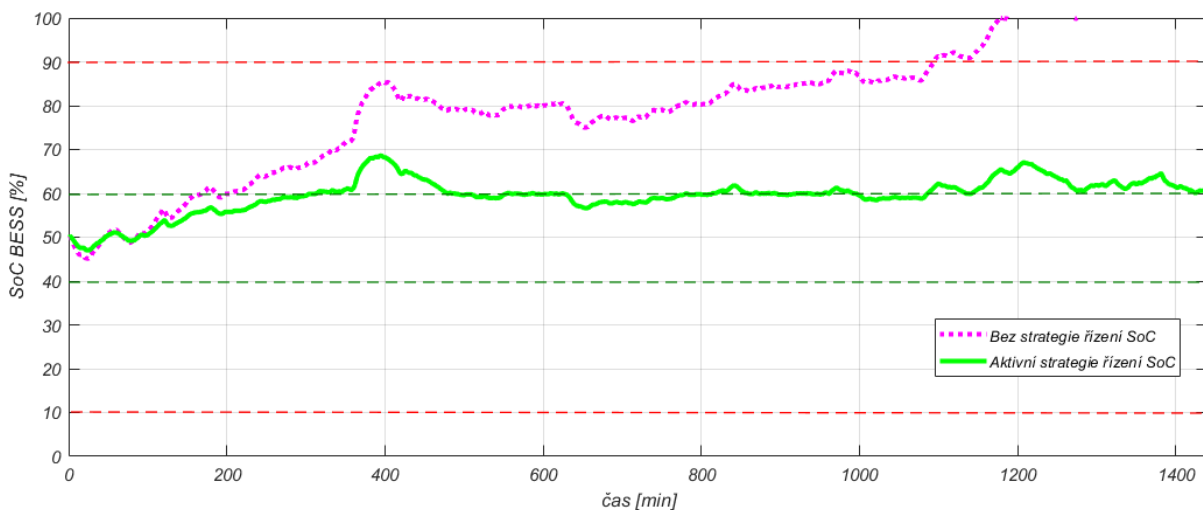
```

%Definice vstupních proměnných (technické parametry) BESS
Crate = 1;           % Hodnota vyb. a nab. Crate (NMC, NCA)           [-]
Pmax = 5;           % Maximální výkon/výše poskytnuté rezervy       [MW]
n_system = 0.95;    % Celková účinnost systému (BESS + trafo)       [-]
pom_CP = 1.6;       % Poměr mezi Cin a Pmax (30 min krit.)         [-]
Cin = Pmax*pom_CP;  % Nejmenší potřebná jmen. kapacita BESS          [MWh]
SoC_start=0.5*Cin;  % Nastavení poč. hodnoty SoC 50%                             [MWh]
fmin = -10;         % Nastavení dolní hranice pásma necitlivosti [mHz]
fmax = 10;         % Nastavení horní hranice pásma necitlivosti [mHz]
t_off = 120;        % Čas odpojení od FCP při krit. stavu         [min]

```

Obrázek 15 - Nastavení vstupních proměnných pro simulaci provozu BESS v prostředí MATLAB

Pro prvotní vizualizaci výstupů a zobrazení funkce modelu provozu BESS jsem v návaznosti na kapitulu 7.1.1. *Analýza historických dat frekvence sítě* zvolil maximální výkon $P_{\max}=5$ MW, jelikož byl stejný výkon využit i pro základní modely činnosti BESS ve dnech maximálních odchylek frekvence. Správnou funkčnost programu a komplexní strategie balancování úrovně nabití bateriové akumulace prvně tedy ověřím porovnáním právě se zmíněným modelem ze dne maxima odchylky frekvence v roce 2018, kde byla využita pouze aktivace rezervy, jejíž výše byla přímo úměrná odchylce.

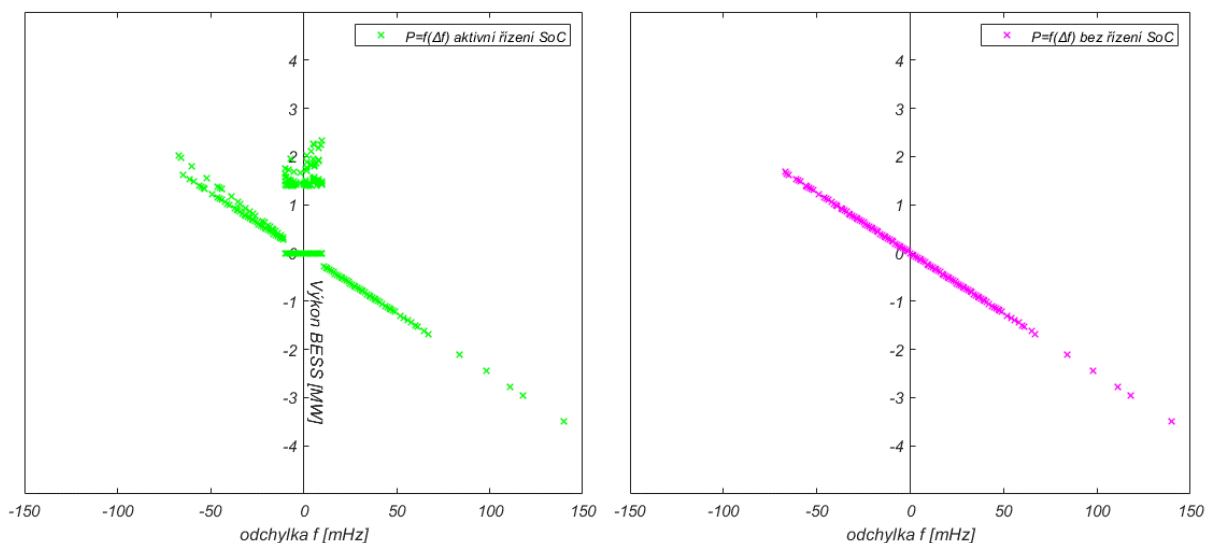


Graf 33 - Porovnání vlivu aktivace strategie řízení SoC BESS během dne maximální kladné odchylky f v roce 2018

Jak je patrné z výše uvedeného grafu, vytvořený program pro poskytování FCP s aktivní strategií řízení úrovně nabití BESS má velice pozitivní vliv na stav SoC během doby poskytování služby. Z grafu lze také vyčíst, že se velmi dobře podařilo využitím všech strategií řízení udržovat SoC v blízkosti ideální pracovní oblasti úrovně nabití BESS během normálního stavu odchylky frekvence v síti.

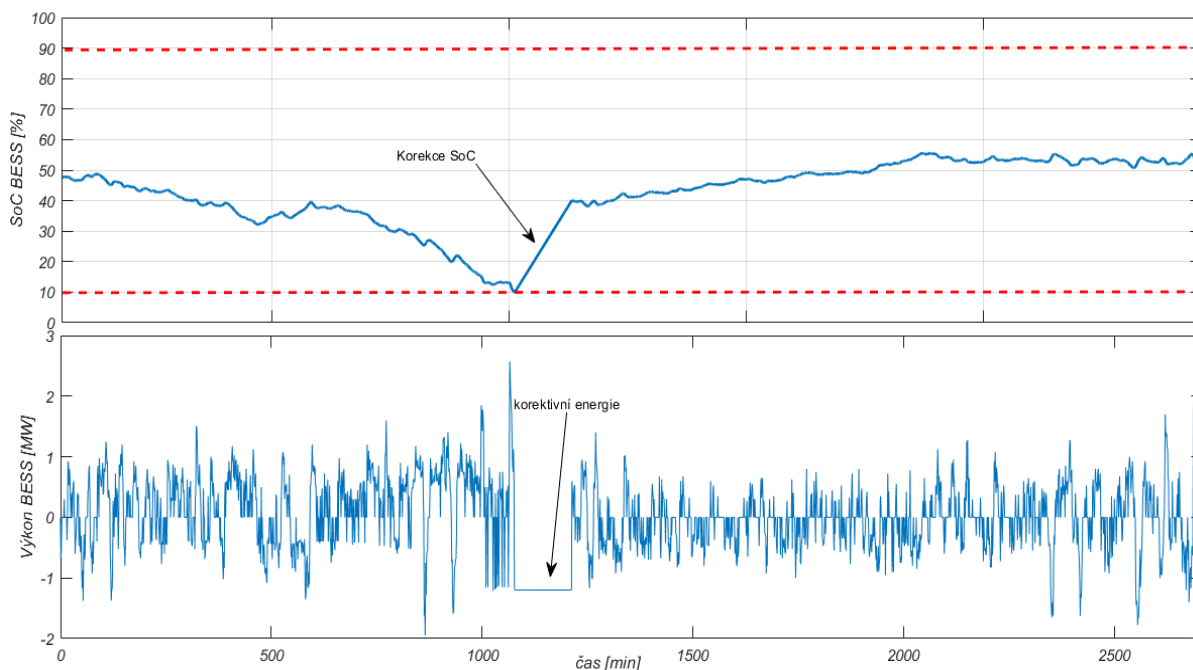
Dále je zapotřebí ověřit, zdali jsou během procesu řízení SoC bateriového systému akumulace energie při chodu programu dodrženy strategie a jejich případné limity. Za tímto účelem vynesu graf pracovních charakteristik aktivovaného výkonu BESS v závislosti na odchylce frekvence v síti. Grafický výstup

statické charakteristiky $P = f(\Delta f)$ modelu by měl korespondovat s *Graf 31*, který reprezentuje povolené strategie při participaci BESS během poskytování PCR (FCR) v Německu.



Graf 34 - Porovnání pracovních charakteristik pro proces aktivního řízení SoC a bez něho

Z tohoto porovnání je patrné, že při aktivním řízení SoC je využíváno jak dovoleného navýšení maximálního výkonu BESS injektovaného do ES, tak možnost balancování uvnitř pásma necitlivosti. Poslední zbývající možná strategie aktivace korektivní energie při odpojení BESS od FCP nebyla během dne maximální kladné odchylky v roce 2018 využita, jelikož SoC nedosáhlo limitních hodnot. Během roční simulace provozu již však předpokládám, že k této situaci dojde, a proto pro úplnost uvedu modelový příklad využití této strategie. Následující analyzovaný stav nastal dne 3.9.2018. Jak je z následujícího grafu patrné, není během doby korekce SoC dodávána služba FCP po dobu 120 minut, jak je dovoleno pro PCR. Zjištění počtu těchto jevů během roku je důležité pro správný odhad počtu hodin BESS, ve kterých bude schopna poskytovat rezervní výkon pro proces obnovy frekvence v ES.



Graf 35 - Využití strategie korektivní energie k obnově SoC po dosažení limitní hodnoty

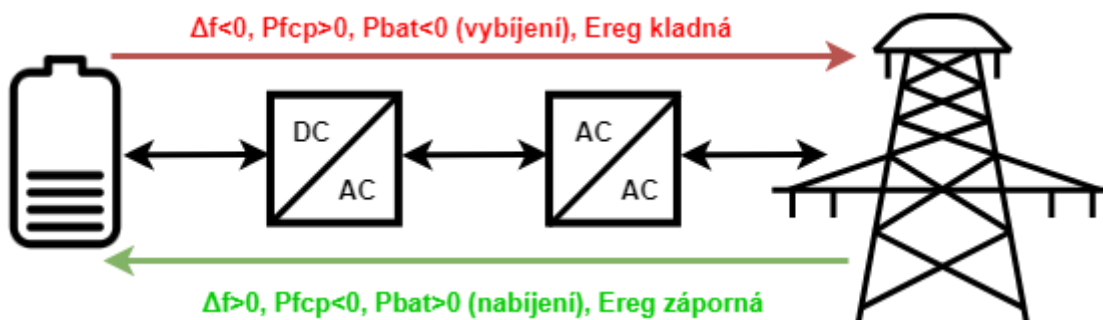
Dle předešlých provedených analýz mého programu modelu činnosti BESS, průběhů SoC a srovnání charakteristik bez a s aktivovanými strategiemi řízení SoC budu sestavený program provozu BESS považovat za plně funkční a odpovídající reálné aplikaci BESS při poskytování FCP.

Následující tabulka obsahuje data, jež jsou již číselné výstupy ročních simulací provozu BESS, které pracují na základě odchylek frekvencí v ES ČR v letech 2013 až 2018. Během těchto simulací ročních provozů počítám s poskytovanou výkonovou rezervou BESS pro potřeby FCP 5 MW, což je poloviční hodnota možného rozsahu poskytované rezervy PCR v Německu, kde je možno poskytovat rezervní výkon od 1 MW do 10 MW. Ostatní technické parametry pro tyto simulace byly využity v hodnotách, které jsou uvedeny na *Obrázek 15 - Nastavení vstupních proměnných pro simulaci provozu BESS v prostředí MATLAB*.

Tabulka 18 - Výsledky simulací ročního provozu BESS s FCR=5 MW

Data frekvence z roku	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Záporná reg. energie FCP- [MWh]	1 733	1 666	1 661	1 665	1 770	1 704
Kladná reg. energie FCP+ [MWh]	1 431	1 315	1 283	1 288	1 386	1 350
Celková Ereg FCP [MWh]	3 165	2 981	2 944	2 953	3 156	3 054
E- využita k balancování SoC [MWh]	219	153	150	149	132	188
E+ využita k balancování SoC [MWh]	519	504	527	527	514	540
Celková E pro řízení SoC⁹ [MWh]	738	657	677	676	646	728
Korekční energie záporná [MWh]	203	152	125	104	99	178
Korekční energie kladná [MWh]	61	25	20	31	23	38
Roční ztráty energie systému [MWh]	205	191	190	191	200	199
Průměrná roční úroveň SoC [%]	54	55	56	56	57	54
Průměrná hloubka cyklů DoD [%]	19	17	18	18	17	19
Počet EFC BESS pro FCP	396	373	368	369	395	382
Celkový počet EFC za rok	488	455	453	454	475	473
Počet stavů vyžadujících korekci SoC	104	70	57	53	48	85
Počet hodin BESS odpojena od FCP	209	141	115	107	97	193
Počet hodin BESS připravena pro FCP	8 551	8 619	8 645	8 677	8 663	8 567
Celková připravenost BESS za rok [%]	97,61	98,39	98,68	98,78	98,89	97,79

Pro jednoznačné pochopení předešlé tabulky a směrů fyzických toků elektrické energie během provozu BESS a aktivace výše zálohy FCR jsem sestavil následující jednoduchý diagram.

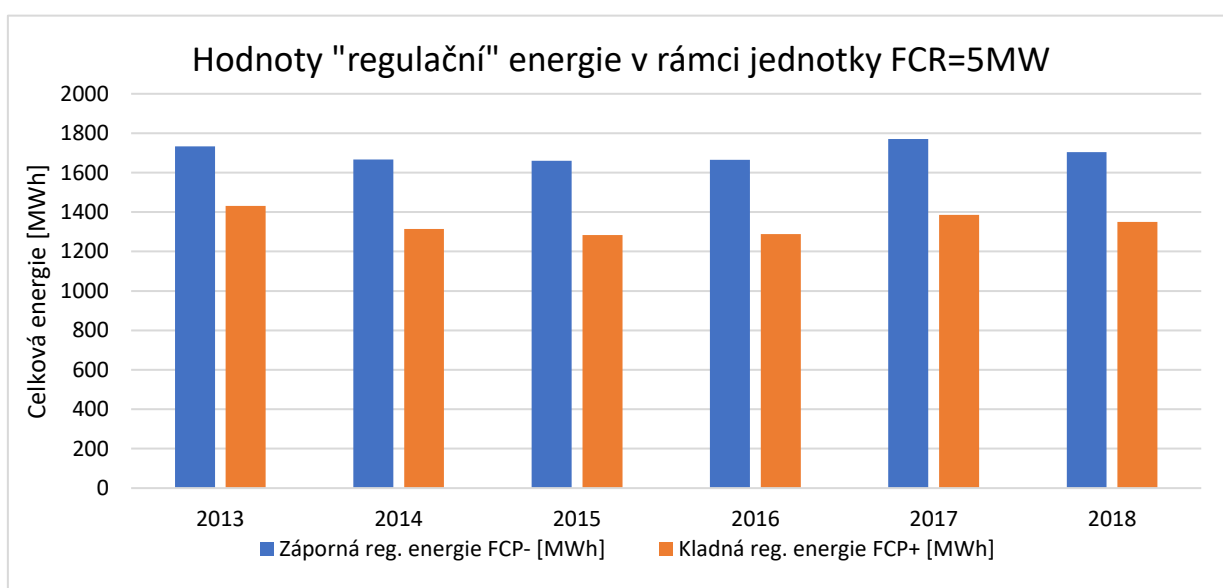


Obrázek 16 - Fyzické toky elektrické energie během poskytování FCP BESS

⁹ Elektrická energie získaná v rámci navýšení P_{max} či v rámci pásma necitlivosti je pro poskytovatele FCP bezplatná

V principu je záporná energie jak regulační, tak i energie, která je využívána k balancování SoC, a elektrickou energií ze sítě odebranou během provozu, což znamená nabíjení baterie a záporný výkon aktivace služby FCP (kladná odchylka f). Naopak kladná energie reprezentuje energii injektovanou do sítě, čímž se bateriová akumulace vybíjí, a výkon ve smyslu aktivace služby FCP je kladný (záporná odchylka f).

Na následujícím grafu jsou znázorněny objemy dodané "regulační" energie pro automatické řízení frekvence soustavy bateriovou akumulací s FCR = 5 MW. Jak je patrné v každém roce došlo v dodání většího objemu záporné Ereg, tudíž se bude bateriový systém častěji nabíjet. Tento poznatek koresponduje s výsledky základní analýzy historických dat frekvencí v kapitole 7.1.1. *Analýza historických dat frekvence sítě.*



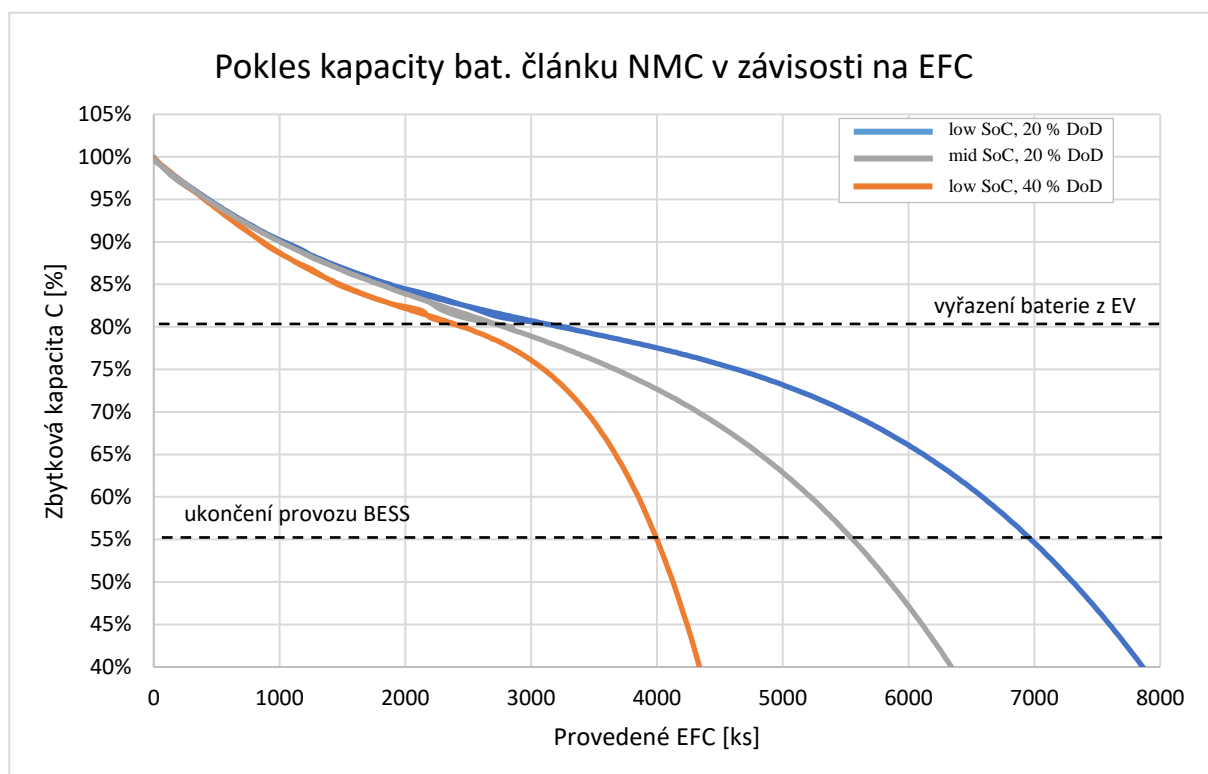
Obrázek 17 - Objemy regulační energie dodané v rámci FCP během let

Dále lze z tabulky vyčíst, že bateriový systém, který poskytuje službu FCP na základě sestaveného programu a vývojového diagramu, který určuje strategii udržování hladiny SoC v optimálním pásmu dovolené pracovní charakteristiky, je v jednotlivých letech **schopen spolehlivě poskytovat rezervní výkon FCR cca 98 % času během roku**. Zbýlý čas je BESS nedostupná pro službu FCP z důvodu procesu korekce SoC, který nastává po dosažení limitních hodnot SoC, po němž má BESS nárok na čas pro obnovení úrovně nabití a to maximálně 120 minut. Tuto hodnotu dostupnosti rezervy výkonu BESS během roku hodnotím jako absolutně dostatečnou pro jejich participaci na procesu automatické regulace frekvence. Dále bylo výsledky simulací poskytování FCP velkokapacitním bateriovým úložištěm potvrzeno tvrzení z *Tabulka 13 - Zhodnocení možností využití BESS*, ve které je uvedeno, že využití vyřazených baterií pro poskytování FCR pro potřeby řízení frekvence v síti je jejich nejvhodnější využití na základě předpokladu mělkých cyklů a oscilace úrovně nabití zhruba okolo SoC = 50 %. Oba tyto teoreticky nabyté předpoklady byly díky výsledkům simulací provozu potvrzeny, jelikož průměrná hladina nabití BESS je během let 55 % a průměrná hloubka cyklů odpovídá 18 %.

7.1.4. Stanovení technické životnosti BESS

V poslední řadě je důležité správně stanovit dobu životnosti uvažovaného bateriového systému. Toto stanovení provedu na základě výsledků simulací provozu při poskytování služby FCP. Získaná doba životnosti bude kritickým faktorem při výpočtu ekonomické efektivity celé aplikace a je proto důležité, aby její odhad byl postaven na co nejvíce reálných datech a poznacích. Pro stanovení výsledné doby životnosti jsem zvolil metodiku na základě posouzení výsledného počtu ekvivalentních plných cyklů (EFC) a průměrných provozních parametrů jako je hladina úrovně nabití článků, průměrná hloubka vybíjecích a nabíjecích cyklů BESS. Tato metodika byla zvolena na základě znalostí získaných v kapitole 4.2. *Proces degradace baterie*. Stanovení degradace BESS v provozu je založeno na několika předpokladech:

- BESS bude složena z bateriových článků chemie NMC (vyšší životnost, lepší tepelná odolnost).
- Bude uvažováno s průměrnou teplotou uvnitř BESS $t_{avg}=25\text{ °C}$ po celou dobu provozu.
- Získané průměrné hodnoty SoC a DoD z modelu budou po celou uvažovanou dobu konstantní.
- Počáteční zbytková kapacita vyřazených bateriových článků bude 80 % C_{in} .
- Zbytkovou kapacitu, při které dojde k ukončení provozu BESS, jsem stanovil na 55 % C_{in} .



Graf 36 - Průběh degradace bateriového článku v závislosti na počtu EFC

Jak je patrné z výše uvedených průběhů poklesu kapacity během provozu, je rychlost degradace baterie silně závislá na hloubce vybíjení a průměrné hladině nabití, při které je baterie provozována. V našem případě BESS během poskytování FCP byla provozována dle výsledků simulací s úrovní SoC od 54 % do 57 % a s hloubkou cyklů DoD od 17 % do 19 %. Pro stanovení délky životnosti využívání BESS se

budu v mém případě řídit **modrou křivkou** popisující průběh degradace bateriového článku při nízkém (low) SoC, což odpovídá hodnotě 50 % SoC a při hloubce pracovních cyklů nepřekračující 20 %. Dle *Tabulka 18 - Výsledky simulací ročního provozu BESS s FCR=5 MW* budu považovat tato kritéria za splněná pro všechny analyzované roky. Výpočet technické doby životnosti BESS pro poskytování služby FCP bude stanoveno dle následujícího vzorce:

$$T_{\frac{z}{2}} = \frac{EFC_{0,55} - EFC_{0,80}}{EFC_{avg}} = \frac{6950 - 3200}{466} = \mathbf{8,04 \text{ let}}, \quad (15)$$

kde

$EFC_{0,55}$	počet provedených EFC při dosažení hladiny 55 % původní hodnoty kapacity
$EFC_{0,80}$	počet provedených EFC při dosažení hladiny 80 % původní hodnoty kapacity
EFC_{avg}	průměrný počet vykonaných cyklů za jeden rok provozu BESS.

Hodnoty EFC pro jednotlivé úrovně zbytkové kapacity jsem odečetl z *grafu 33* na předchozí stránce. Výše vypočtená hodnota technické doby životnosti BESS, byla vypočtena na základě průměrného počtu EFC během simulací poskytování FCP během let 2013 až 2018. Jak je patrné, počty EFC se mezi jednotlivými lety liší. Pokud by byl počet EFC během provozu BESS roven 453 cyklů, stejně jako tomu dle simulace nastalo v roce 2015, výsledná doba životnosti by byla $T_{2015} = 8,27$ let. Naopak pokud bych na celou dobu provozu aplikoval počet EFC z roku 2013, kdy jich proběhlo 488, výsledná doba životnosti by byla $T_{2013} = 7,68$ let. Do budoucna však bohužel nelze příliš předvídat kolik těchto cyklů bude muset BESS během poskytování služby FCP vykonat. Z tohoto důvodu budu v následujících kapitolách brát v úvahu dobu životnosti ve výši 8 let pro bateriové články v bateriovém úložišti, které je složené z vyřazených bateriových článků z EV.

7.2. Návrh bateriového systému

V této kapitole provedu kompletní technický návrh bateriového systému akumulace, který bude schopen dostát požadavkům, které na něj budou kladeny během poskytování regulace frekvence v síti. **Bateriový systém bude složen z bateriových článků chemie katody NMC a bude dimenzován na hodnotu maximálního výkonu 5 MW.** Tento výkon jsem zvolil v návaznosti na teoretické poznatky z kapitoly 6.2.2. *Trh s PpS*, které predikují nárůst konkurence v oblasti poskytování všech SVR a pokles cen za poskytované rezervní výkony. Případné předdimenzování maximální možné poskytované rezervy BESS by mohlo vést k neúspěšné účasti na výběrovém řízení na budoucím propojeném trhu s FCR a k nevyužitému výkonu bateriové akumulace. Případné úvahy o nevysoutěžení požadované výše poskytovaného rezervního výkonu či výše maximálního instalovaného výkonu se mohou stát předmětem citlivostních analýz na výslednou ekonomickou efektivitu provozu BESS. Celkovou instalovanou kapacitu s ohledem na dodržení 30minutového kritéria, strategie provozu BESS a také degradace baterie během let používání stanovím na hodnotu 10 MWh.

Bateriový systém akumulace pro poskytování FCP bude kompletován jako komplexní systém, který již disponuje všemi potřebnými prvky a je dodáván dle potřebné kapacity a výkonu jako jeden či více

kontejnerů. Jelikož sekundární bateriové články pracují se stejnosměrným napětím a proudem, bude nutné do systému aplikovat vhodný střídač, jehož jmenovitý činný výkon bude schopen pokrýt maximální požadovaný výkon pro potřeby FCP. BESS může být pro potřeby poskytování SVR připojeno také do distribuční soustavy, pokud s tím provozovatel dané DS souhlasí. Pro budoucí návrh budu uvažovat povolení provozování BESS na hladinách VN ze strany PDS a jeho připojení do DS na hladinách 22 kV či 35 kV. V návaznosti na tento předpoklad bude muset systém akumulace disponovat NN/VN transformátorem s dostatečným výkonem. Dále bude muset kontejner bateriové akumulace obsahovat jak NN, tak VN rozvaděče. Vzhledem k požadavku na rychlý a bezporuchový provoz BESS, na řízení nabíjení a vybíjení v reálném čase a udržování optimální teploty během provozu bude kontejner disponovat vhodnou elektronikou a řídicími systémy v podobě BMS a TMS. Pro zajištění bezpečnosti provozu a získání následné certifikace, musí být kontejner vybaven také vhodnou vzduchotechnikou a hasícím systémem.

Na odborných konzultacích ve společnostech AKU-BAT a IBG bylo zjištěno, že cena kapacity systému v podobě bateriových článků tvoří zhruba 45 % až 50 % výsledné ceny bateriového úložiště. Z tohoto zjištění jsem schopen dle předešlých analýz již instalovaných bateriových velkokapacitních kontejnerových úložišť v kapitole 5.6.1. *Bateriová úložiště v České republice* zjednodušeně vypočítat, jak velké investiční výdaje budou tvořit ostatní potřebné komponenty BESS.

Tabulka 19 - Porovnání investičních nákladů projektů

Projekt	BESS Prakšice	BESS Mydlovary	BESS Obořiště
Investiční náklady [tis. Kč]	20 000	22 000	25 000
Kapacita [MWh]	1,2	1,75	1,3
Výkon [MW]	1	1	1
Platba za kapacitu [tis. Kč]	9 000	9 900	11 250
Cena za 1 MWh [tis. Kč]	7 500	5 657	8 654
Cena za ostatní prvky [tis. Kč]	11 000	12 100	13 750
Ostatní prvky na 1 MWh [tis. Kč]	9 167	6 914	10 577

Dle údajů v této tabulce vychází průměrná cena za instalovanou kapacitu ve výši 1 MWh cca 7 300 tis. Kč. Při podrobnějším zkoumání důvodu výše investice v případě projektu BESS Obořiště bylo zjištěno, že vyšší investiční náklady jsou způsobeny tím, že samotné kontejnerové řešení již disponuje transformátorem a vysokonapěťovým rozvaděčem, tudíž již nejsou potřeba žádné další investice. Z technické dokumentace od výrobce tohoto All-in-one BESS lze zjistit ceny těchto komponentů[54]:

- Transformátor, 1,25 MW, 22 kV – 745 tis. Kč bez DPH
- VN rozvaděč, ABB, Safeplus – 805 tis. Kč bez DPH.

Při započítání cen těchto prvků přepočítám průměrnou cenu instalované kapacity BESS za 1 MWh na 7 000 tis. Kč. Výši investice ostatních položek nutných pro instalaci a provoz bateriového úložiště vztaheného na 1 MW výkonu systému lze pak vyčíslit na zhruba 8 600 tis. Kč. Tato cena ostatních položek za 1 MW výkonu BESS v sobě zahrnuje vše následující:

- transformátory a potřebné měniče (střídače, usměrňovače),
- řídicí systémy (BMS, EMS a TMS),
- potřebný software,
- VN, NN rozvaděče a ochrany,
- vzduchotechnika, hasící a bezpečnostní systémy,
- bateriové kontejnery a ostatní potřebné materiály,
- dopravu, instalace a uvedení do provozu.

Při pohledu na technické parametry současných projektů bateriových úložišť v ČR, je patrné, že nelze mnou uvažovaný bateriový systém o jmenovité kapacitě 10 MWh vzhledem k velikostem bateriových modulů sestavit pouze do jednoho kontejnerového úložiště. Z tohoto důvodu bude tato celková kapacita rozdělena do 5 identických bateriových kontejnerů, které budou disponovat totožnými technickými parametry i ostatními prvky a budou poskytovat službu FCP jako jedno velké bateriové úložiště. Technické parametry nejdůležitějších součástí jednoho kontejnerového BESS jsou uvedeny v následující tabulce [54]. Z uvedených účinností využitých střídačů a transformátoru stanovím výslednou účinnost systému, která činí 95 %.

Tabulka 20 - Technické parametry navrženého kontejnerového BESS

Elektrické parametry BESS	
Jmenovitý výkon činný	1 MW
Instalovaná kapacita BESS	2 MWh
Povolený C-rate	1 -
Maximální napětí NN strana	1000 V
Jmenovitá frekvence	50 Hz
Použité střídače - 2xAEG 4Q	
Jmenovitý zdánlivý výkon	1000 kVA
Jmenovitý činný výkon	1000 kW
Jmenovitý jalový výkon	1000 kVar
Maximální účinnost dlouhodobá	98,3 %
Nominální frekvence	50 Hz
Pracovní rozsah Cos ϕ	cap. 0-1-0 ind.
Deklarovaná životnost	10 let
Transformátor NN/VN	
Výstupní napětí (sekundární)	22/35 kV
Jmenovitý výkon zdánlivý	1,25 MVA
Účinnost	97 %
Nominální frekvence	50 Hz

Po provedení technického návrhu bateriového systému a analýzy ceny za tyto položky již mohu stanovit cenu za technickou část BESS. Do výsledné pořizovací ceny dlouhodobého hmotného majetku jsou však zahrnuty i další položky, které jsou nutné pro realizaci projektu BESS a musí být tedy zahrnuty do

celkových investičních výdajů, které budou vynaloženy. Pro správné stanovení výše investice bateriového úložiště je tedy nutno tyto položky identifikovat a správně ocenit.

V podkapitole 6.1. *Legislativní rámec akumulace v ČR* jsem identifikoval body, které jsou nutné pro optimální rozvoj bateriové akumulace energie. Při návrhu bateriového úložiště, které bude provozováno od přelomu roku 2020/2021, se bude uvažovat, že již bude možnost získat samostatnou licenci pro podnikání v energetickém odvětví pro bateriové akumulace a ukládání elektrické energie bude zavedeno jako předmět podnikání v energetickém odvětví. Pro tuto licenci budu uvažovat její platnost 25 let stejně jako je tomu u ostatních licencí pro podnikání v energetickém odvětví. Výši správního poplatku za tento nový typ licence stanovím rovněž ve stejné výši jako za licenci na výrobu elektřiny a to 10 tis. Kč. BESS bude muset také získat licenci pro obchod s elektřinou, jelikož bude během jejího provozu využíván trh s elektřinou, či bilaterální dohody s vhodnou protistranou pro nákup či prodej elektrické energie pro potřeby korekce SoC. Výše správního poplatku za tento typ licence je stanovena ERÚ ve výši 100 tis. Kč. Všechny tyto licence vydává ERÚ a jsou nárokové po splnění několika požadavků.

Dále nesmí být opomenut fakt, že navrhované BESS bude provozováno jako samostatně stojící zařízení a bude tedy na něj možná pohlíženo již jako na výrobu elektřiny, jejíž celkový instalovaný elektrický výkon bude vyšší než 100 kW a bude tedy nutné pro jeho výstavbu získat státní autorizaci, kterou vydává MPO. Autorizace již není nároková a budu dále předpokládat, že po dodání všech potřebných povolení a studie vlivu na životní prostředí, bude získána. Celkovou výši výdaje na získání autorizace stanovím na 100 tis. Kč. Bateriová akumulace bude připojena k distribuční soustavě na hladině napětí VN, jmenovitě 35 kV. Měrný podíl žadatele o připojení na oprávněných nákladech spojených s připojením a zajištěním požadovaného příkonu a výkony se řídí Vyhláškou č. 16/2016 Sb. o podmínkách připojení k elektrizační soustavě a přesná výše plateb je k nalezení v příloze č. 8 této vyhlášky. Měrný podíl žadatele se liší dle typu zařízení, zdali se jedná o odběrné zařízení či výrobu elektřiny. Pro účely této práce budu považovat BESS v návaznosti na nutnost získání autorizace na výrobu elektřiny za výrobu elektřiny. Měrný podíl je při standardním připojení do distribuční soustavy VN 640 tis. Kč/ MW. Standardní způsob připojení v sobě zahrnuje veškeré potřebné úpravy v přípojné rozvodně, včetně výstavby vedení VN. V poslední řadě musí bateriové úložiště získat certifikace na poskytování dané PpS, v našem případě certifikace na službu FCP. Certifikace na poskytování PpS se zpravidla vydává na 5 let. Z důvodu připojení BESS do DS, musí být k certifikaci také dodán souhlas provozovatele DS s poskytováním PpS. Provozovatel distribuční soustavy vydává souhlas na základě studie vlivu poskytování PpS na chod sítě. Výše platby za celý proces vyřízení certifikace a všech potřebných dokumentů stanovím na hodnotu 200 tis. Kč.

Tabulka 21 - Stanovení výše prvotní investice BESS

Položka investice	Počet	Cena [tis. Kč]	Poznámka
Vyřazené bateriové články	10 MWh	14 100	60 USD/kWh
Ostatní položky systému	5 MW	43 000	8600 tis. Kč/MW
Dodatečné VN propojení BESS	1 ks	1 800	propojení 5ti BESS
Licence obchod s elektřinou	1 ks	100	-
Licence na výrobu elektřiny	1 ks	10	výrobna nad 1 MW
Připojení k DS VN	5 MW	3 200	připojení výrobní el.
Získání státní autorizace	1 ks	100	stavební povolení atd.
Certifikace pro PpS	1 ks	200	včetně studie vlivu na ŽP
Celková výše investice za BESS 5 MW		62 510	tis. Kč

Dle výše uvedené tabulky investičních výdajů bude celková výše prvotní investice na pořízení bateriového systému ukládání energie cca 62,5 milionu Kč.

7.3. Ekonomický model provozu BESS

V rámci této kapitoly provedu ekonomické hodnocení provozu navrženého modelu BESS na základě všech teoreticky nabitých poznatků a definovaných předpokladů jak v této, tak v předchozích kapitolách. V rámci ekonomického hodnocení budou navrženy tři základní scénáře vývoje během doby provozování BESS.

Jako základní předpoklad ekonomického modelu stanovím to, že BESS bude realizován již existující technologickou firmou X, která rozšiřuje oblast svého působení a vstupuje nově do energetického odvětví se záměrem poskytovat SVR. Tato firma X bude projekt financovat v plné výši z vlastního kapitálu a nebude tedy využít cizí kapitál k pořízení bateriového úložiště. Z tohoto důvodu nebudu dále brát v úvahu možný efekt uplatnění daňového štítu.

Jak bylo stanoveno v kapitole 7.4. Stanovení technické životnosti BESS, je životnost bateriových článků simulací stanovena na 8 let. S touto dobou životnosti však nebudu počítat pro celý projekt, jelikož ostatní komponenty jako jsou střídače, usměrňovače či transformátory disponují v průměru mnohem delší dobou životnosti. A jak je také patrné z Tabulka 21 - Stanovení výše prvotní investice BESS, náklady na jmenovitou kapacitu v podobě bateriových článků tvoří zhruba 25 % výše prvotní investice a do budoucna se předpokládá další pokles cen vyřazených bateriových článků. Na základě těchto tvrzení bude stanovena vyšší doba životnosti za předpokladu, že **v 8. roce provozu BESS dojde ke kompletní výměně celé kapacity za “nové“ vyřazené bateriové články z EV.** Tato akce nebude považována za modernizaci bateriového úložiště, jelikož nedojde k vylepšení technických parametrů, ale pouze k uvedení úložiště do původního stavu jako na počátku životnosti. Výměna bude tedy považována za opravu a nebude odepisována do konce doby životnosti, ale bude zavedena pouze jako náklad v roce provedení.

Pro sestavení ekonomického modelu provozu BESS jsem si definoval následující předpoklady a vstupy:

- ČR bude od roku 2020 členem společného trhu s FCR, vyrovnání výší plateb za rezervní výkony pro potřeby služby FCP.
- V rámci fungování FCR trhu dojde k přechodu k obchodování s hodinovými produkty a využívání denních aukcí D-1. [55]
- BESS bude plně v provozu pro potřeby FCP od začátku roku 2021.
- Rok 2020 bude uvažován pro potřeby výstavby, instalace zařízení, uvedení bateriového úložiště do provozu a pro provedení potřebných certifikačních testů a měření pro poskytování FCR.
- Sazba daně z příjmů právnických osob (firma X) bude po celou dobu životnosti projektu 19 %.
- Životnost projektu je na základě simulace degradací baterií v provozu (životnost 8 let) a kompletní výměně bateriových článků v 8. roce stanovena na 16 let.
- BESS bude jako DHM zařazeno pro účely daňových nákladů¹⁰ do odpisové skupiny 3 (akumulátory, baterie), jejíž minimální doba odpisování DHM je 5 let.
- BESS bude účetně odepisován lineárně po dobu 10 let tedy ve výši 10 % ročně (do výměny bateriových usměrňovačů).
- V 10. roce bude provedena výměna měničů a řídicích jednotek BESS ve výši 25 % z investičních nákladů ostatních položek v prvotní investici.
- Nominální roční růst cen ve výši 2 % bude po celou dobu životnosti projektu konstantní.
- Očekávaný výnos bude vzhledem k tomu, že se průměrná výnosnost investic v oblasti moderní energetiky a OZE pohybuje kolem 7 %, stanoven s přihlédnutím na možnou zvýšenou rizikovitost těchto pilotních projektů na 10 % (princip opatrnosti).
- BESS bude připravena dle simulací poskytovat FCP 98 % času během roku, což odpovídá cca 8 584 hodinám (tj.357 dnů), kdy se zúčastní výběrového řízení.
- Cenu nakupované korekční energie (nabíjení BESS) stanovím dle průměrné historické ceny silové elektřiny a jejího navýšení o 30 % pro zahrnutí principu opatrnosti na 1800 Kč/MWh.
- Cenu prodávané korekční energie (vybíjení BESS) určím na hodnotu 900 Kč/MWh jako 50 % z ceny nakupované silové energie.
- Provozní roční náklady BESS uvažuji ve výši 2 % z výše počáteční investice po celou dobu.
- Předpokládám výměnu bateriových článků ve výši 2 % jmenovité kapacity z důvodu poruchy každý třetí rok provozu BESS (bude se opět jednat o vyřazené bateriové články z EV).
- Na konci 5. roku provozu BESS nutno obnovit certifikaci pro poskytování PpS a licenci pro obchod s elektřinou.

¹⁰ Daňové odpisy nám stanovují maximální výši daňového nákladu, o který můžeme snížit základ daně. V mém případě pravděpodobně nastane jev: účetní odpisy < daňové odpisy, tudíž mohu pro daňové účely využít účetní odpisy. Prakticky dojde k navýšení daňového základu o rozdíl mezi výší účetních a daňových odpisů.

- Jelikož bude BESS umístěno na volném prostranství bez stále přítomné obsluhy, bude zřízeno pojištění a výše roční platby pojištění stanovím jako 1,5 % z výše prvotní investice.
- Pro účely DP budu uvažovat po ukončení doby životnosti odprodej všeho zařízení ve výši 10 % prvotní investice a s výdaji spojenými s ukončením provozu ve výši 2 % prvotní investice.
- Výnosy z poskytování FCP budou stanoveny na základě již dříve predikovaného vývoje budoucích cen FCR (*Graf 23 - Predikce možného budoucího vývoje průměrných plateb za rezervy SVR*).

Následující předpoklady a vstupy budou ve stejných hodnotách a zněních využity ve všech třech základních scénářích ekonomického modelu, které vytvořím. Mé základní scénáře budou následující: pesimistický, optimistický a nejpravděpodobnější střední scénář. Parametr, který bude nejvíce ovlivňovat výslednou ekonomickou efektivitu investice, je zajisté výše platby za rezervní výkony pro FCP. Každý ze scénářů bude pracovat se třemi možnými vývoji dle již dříve predikovaných možných scénářů vývoje ceny FCR (viz *Graf 23 - Predikce možného budoucího vývoje průměrných plateb za rezervy SVR*), a tak může dojít k přímému srovnání. Rekapitulace predikovaných vývoju cen za poskytnuté výkonové rezervy pro službu FCP je uvedena v tabulce níže.

Tabulka 22 - Scénáře vývoje ceny FCR

Scénáře vývoje výše platby za FCR pro službu FCP [Kč/MW/hod]																
rok	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036
FCP1	517	343	245	230	235	239	244	248	253	257	262	266	271	275	280	284
FCP2	517	346	225	248	275	302	325	351	376	385	393	401	409	417	425	434
FCP3	517	485	465	434	465	474	484	493	503	513	523	532	542	552	561	571

Scénáře se mezi sebou budou lišit hodnotami následujících vstupů/ proměnných:

- Průměrný počet vyhraných výběrových řízení na poskytnutí FCR – počet hodin poskytování služby FCP.
- Průměrná výše vysoutěžené poskytnuté rezervy FCR vlivem působení propojeného evropského trhu s PpS.
- Růst cen silové elektřiny využívané pro korekci SoC při stavu dosažení limitních hodnot.
- Růst objemu potřebné korekční energie během let provozu BESS.

7.3.1. Optimistický scénář

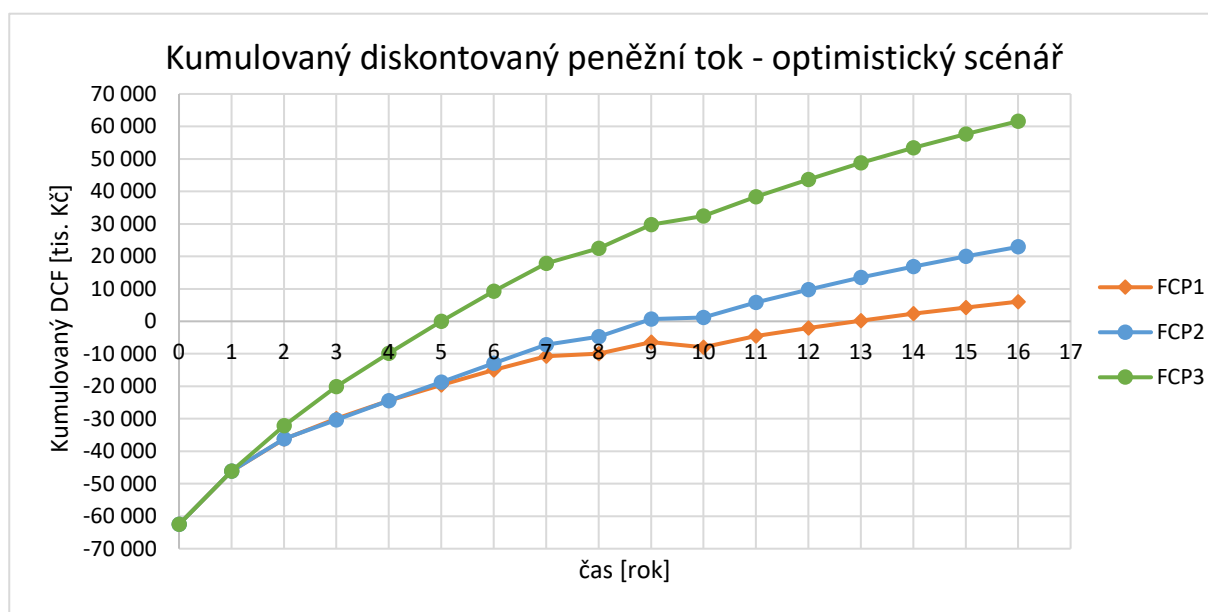
V optimistickém scénáři budu předpokládat po celou dobu provozu BESS nízký nárůst počtu bateriových akumulací poskytujících SVR v ČR, a tedy i nedostatek poskytovatelů služby FCP. Nízká konkurence poskytovatelů bude uvažována i z důvodu zavedení emisních limitů plynoucích z dokumentů BAT BREF od roku 2024. Ve scénáři bude dále uvažováno vysoutěžení FCR tendrů pro všechny hodiny v roce, kdy je BESS schopna FCP spolehlivě dodávat, a to v plné výši celkového jmenovitého výkonu BESS ($P_{jm}=5$ MW). BESS bude tedy ekonomicky využívat celý svůj maximální výkon a kapacitu. Objem nakupované i prodávané korekční energie bude růst o 1 % ročně. Cena silové

elektriny, která ovlivní výši výdajů i příjmů za korekční energii, bude růst konstantně o 2 % meziročně po celou dobu životnosti projektu. Na základě těchto předpokladů vývoje v rámci optimistického scénáře a dodržení předešlých předpokladů jsem spočítal základní ukazatele ekonomické efektivity investice, jejichž hodnoty jsou uvedeny v následující tabulce níže. Dále přikládám grafy průběhů hotovostních toků během let provozu BESS.

Tabulka 23 - Výsledky ekonomického hodnocení investice v rámci optimistického scénáře

Ekonomické hodnocení optimistický scénář

Ukazatel ekonomické efektivity	FCP1	FCP2	FCP3	jednotka
Čistá současná hodnota - NPV	7 271	24 129	62 822	tis. Kč
Vnitřní výnosové procento - IRR	12 %	16 %	25 %	%
Prostá doba návratnosti - Ts	6	5,5	3,6	rok
Diskontovaná doba návratnosti - Tds	13	9	5	rok



Graf 37- Kumulovaný DCF optimistický scénář

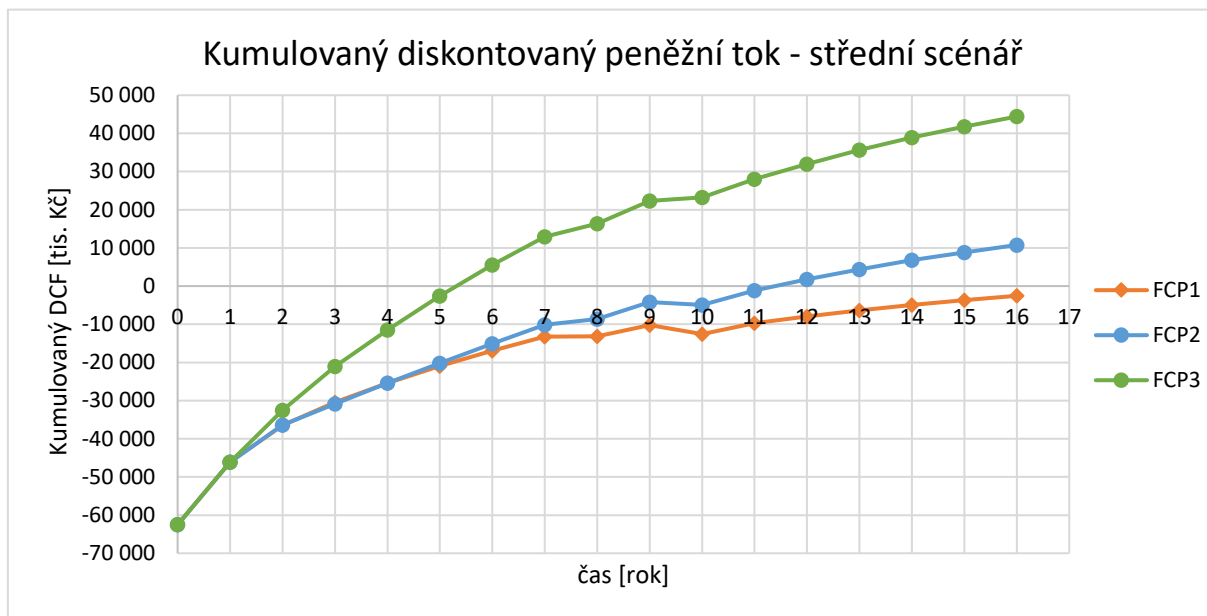
7.3.2. Střední scénář

V tomto scénáři již počítám s dostatečným nárůstem počtu BSAE na území České republiky, které se budou chtít podílet na poskytování SVR. Z tohoto důvodu již nebude zanedbán vliv početné konkurence, která se bude zúčastňovat výběrového řízení o objemy rezervovaného výkonu pro FCP. Pro prvních 5 let budu počítat s průměrnou roční hodinovou poskytnutou FCR ve výši $P_{jm}=5$ MW. Od 6. roku zahrnu postupný pokles vysoutěžené hodinové poskytnuté rezervy tak, že budu počítat meziroční pokles o 1,5 %. Průměrný počet vysoutěžených hodin poskytování FCR za rok bude klesat konstantně o 1 % meziročně. Tento vývoj by měl reprezentovat nárůst konkurence v oblasti BESS a vliv vznikajícího propojeného evropského trhu s PpS, skrze který bude moci ČEPS nakupovat určité procento objemů jednotlivých SVR. Objem nakupované i prodávané korekční energie bude růst o 2 % ročně. Cena silové elektriny, která ovlivní výši výdajů i příjmů za korekční energii, bude růst o 3 % meziročně po celou dobu životnosti projektu.

Tabulka 24 - Výsledky ekonomického hodnocení investice v rámci středního scénáře

Ekonomické hodnocení střední scénář

Ukazatel ekonomické efektivity	FCP1	FCP2	FCP3	jednotka
Čistá současná hodnota – NPV	-5 776	7 540	41 186	tis. Kč
Vnitřní výnosové procento – IRR	8 %	12 %	21 %	%
Prostá doba návratnosti – Ts	6,5	6	4	rok
Diskontovaná doba návratnosti – Tds	x	11,5	5,5	rok



Graf 38 - Kumulovaný DCF střední scénář

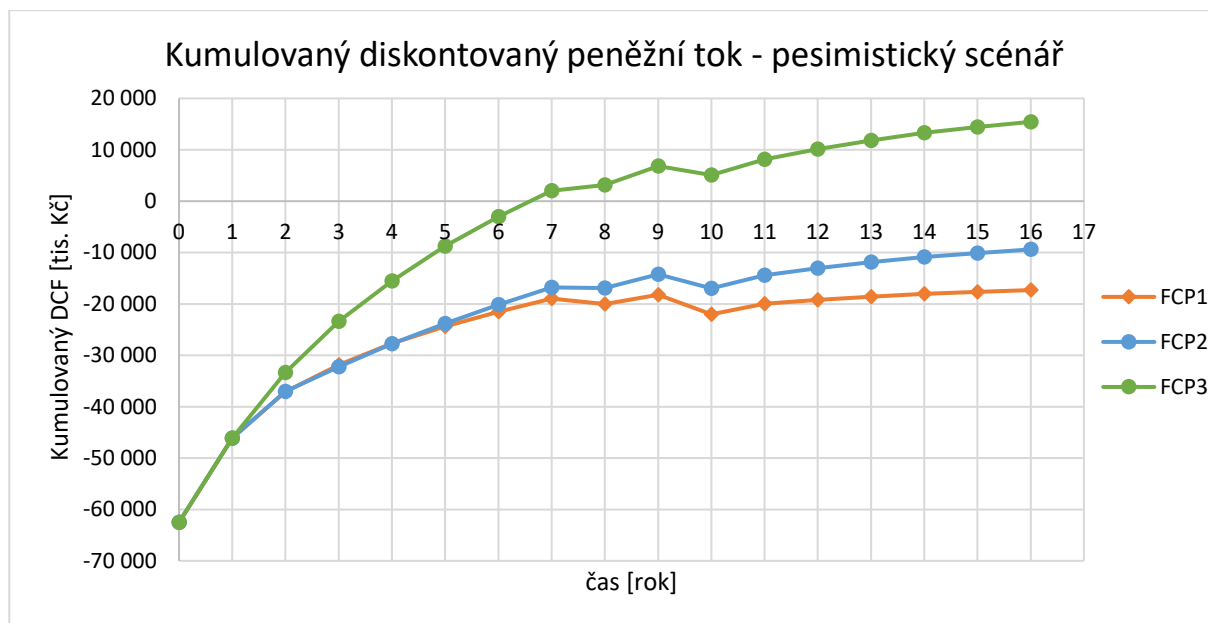
7.3.3. Pesimistický scénář

V pesimistickém scénáři budu uvažovat s vysokým a rychlým nárůstem počtu BSAE poskytujících službu FCP. Dále započítám silný vliv nově vznikajícího propojeného evropského trhu s PpS. Tyto faktory povedou k vysoké míře konkurence v oblasti poskytování FCR a k velké míře nejistoty objemu vysoutěžených hodin i velikosti poskytnutých rezerv do budoucna. Pokles počtu vysoutěžených hodin za prvních 5 let provozu budu uvažovat 5 % meziročně. Od 6. roku provozu až do konce životnosti budu počítat s mírnějším poklesem 3 % meziročně. Výše vysoutěžené poskytnuté rezervy bude konstantně klesat o 2,5 %. Objem nakupované i prodávané korekční energie bude růst o 3 % ročně. Cena silové elektřiny, která ovlivní výši výdajů i příjmů za korekční energii, bude růst o 3 % meziročně po dobu prvních 5 let provozu a poté o 4 % do konce životnosti projektu.

Tabulka 25 - Výsledky ekonomického hodnocení investice v rámci pesimistického scénáře

Ekonomické hodnocení pesimistický scénář

Ukazatel ekonomické efektivity	FCP1	FCP2	FCP3	jednotka
Čistá současná hodnota – NPV	-16 091	-8 175	16 650	tis. Kč
Vnitřní výnosové procento – IRR	2 %	7 %	16 %	%
Prostá doba návratnosti – Ts	14,5	10,5	4,5	rok
Diskontovaná doba návratnosti – Tds	x	x	6,5	rok



Graf 39 - Kumulovaný DCF pesimistický scénář

7.3.4. Zhodnocení výsledků ekonomických scénářů

V tabulce níže jsou uvedeny vypočtené hodnoty zvolených ekonomických ukazatelů pro všechny možné varianty základních scénářů a scénářů predikujících budoucí vývoj cen FCR.

Tabulka 26 - Komplexní zhodnocení výsledku ekonomiky provozu BESS

Očekávaný výnos 10 %	Optimistický scénář			Střední scénář			Pesimistický scénář		
	FCP1	FCP2	FCP3	FCP1	FCP2	FCP3	FCP1	FCP2	FCP3
NPV [tis. Kč]	7 271	24 129	62 822	-5 776	7 540	41 186	-16 091	-8 175	16 650
IRR [%]	11,99	16,12	25,13	7,86	12,28	21,46	2,43	6,81	15,74
Tds [rok]	13	9	5	x	11,5	5,5	x	x	6,5
Ts [rok]	6	5,5	3,6	6,5	6	4	14,5	10,5	4,5

Z tabulky je patrné, že dle mých nastavených scénářů a předpokladů by se investice ekonomicky nevyplatila pouze ve třech případech. Tento výsledek hodnotím velice kladně, jelikož i základní předpoklady, které mají všechny scénáře společné, byly nastaveny s ohledem na princip opatrnosti velice přísně a často byly nadhodnoceny. Ve všech scénářích je také počítáno s vysokými náklady na výměnu hlavních součástí BESS a bateriových článků, které nejsou považovány za modernizaci, což znamená vysoké výdajové zatížení projektu v daném roce výměny, bez možnosti tento náklad odepisovat. Dle mého názoru je nejpravděpodobnější vývoj ceny za poskytované výkonové rezervy podle scénáře FCP 2, který již počítá s relativně velkým poklesem výše plateb za FCR vlivem vzniku EU platformy pro obchodování s PpS. Rovněž střední scénář vývoje participace BESS na poskytování provozu považuji za velice reálný, jelikož je zde opět počítáno s poklesem počtu hodin poskytujících FCR i její průměrnou roční velikost. Kombinaci těchto scénářů, tedy Střední scénář – FCP 2, bych stanovil jako stěžejní při rozhodování, zda investici do BESS skutečně realizovat či nikoliv. Z hodnot základních ekonomických ukazatelů ($NPV_{SC_FCP2} = 7\,540$ tis. Kč a $IRR_{SC_FCP2} = 12,28$ %) budu

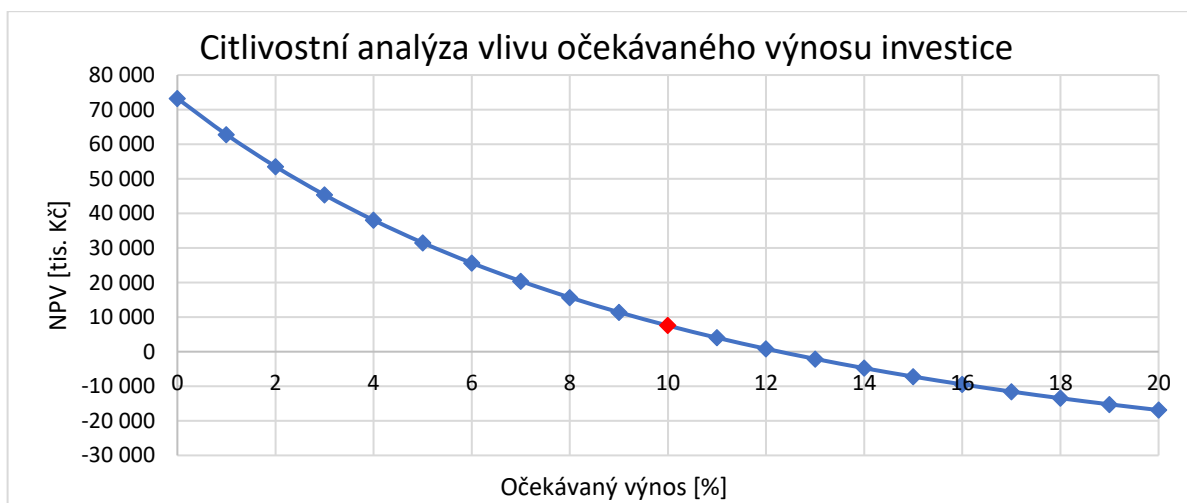
považovat tuto investici do bateriového úložiště za účelem poskytování výkonové rezervy pro proces automatické regulace frekvence jako ekonomicky rentabilní. Pro podrobnější pochopení míry vlivu jednotlivých vstupních veličin na výslednou ekonomičnost modelu provozu BESS provedu v následující kapitole citlivostní analýzu zvolených vstupních parametrů.

8. Citlivostní analýza

Všechny citlivostní analýzy v této kapitole budou provedeny za předpokladu, že kromě zkoumaného vstupního parametru modelu zůstanou všechny ostatní vstupní veličiny neměnné. Bude se tedy jednat o matematické vyjádření závislosti kritériální hodnoty na zkoumaném parametru, v mém případě závislosti NPV na zvoleném parametru. V předchozí kapitole jsem stanovil jako stěžejní pro budoucí rozhodování, zdali projekt BESS pro FCP realizovat či nikoliv, výsledek základního středního scénáře při středním budoucím vývoji cen FCR. Z tohoto důvodu provedu podrobnější citlivostní analýzu právě tohoto modelu, abych případně mohl identifikovat ty vstupní veličiny, které s sebou přinášejí největší faktor rizika. V následující tabulce jsou pro rekapitulaci uvedeny hodnoty vstupních veličin modelu v případě základního středního scénáře a scénáře vývoje cen FCP2.

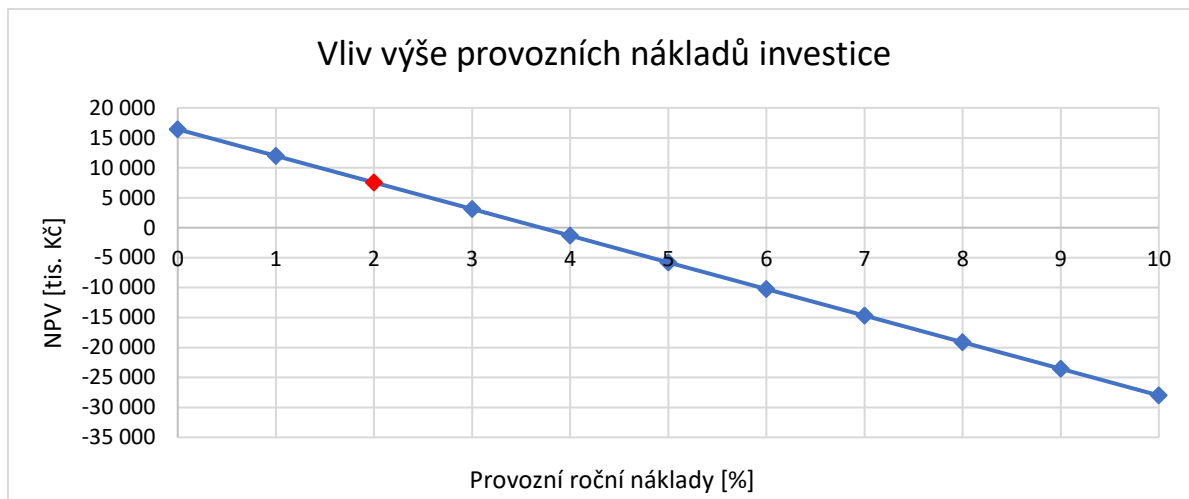
Tabulka 27 - Hodnoty vstupních veličin modelu scénáře SS-FCP2

Nominální meziroční růst cen	2%
Kurz dolaru [Kč/USD]	23,50
Očekávaný výnos	10%
Růst cen silové elektřiny	3%
Provozní náklady (z investice)	2%
Výše reinvestice 10. rok	25%
Růst objemu nakupované Ekor	2%
Růst objemu prodávané Ekor	2%
Procento měněných bat. článků	2%
Interval výměny článků [rok]	2
Meziroční pokles hodin VŘ	1%
Meziroční pokles P pro FCR (od 6.roku)	1,5%



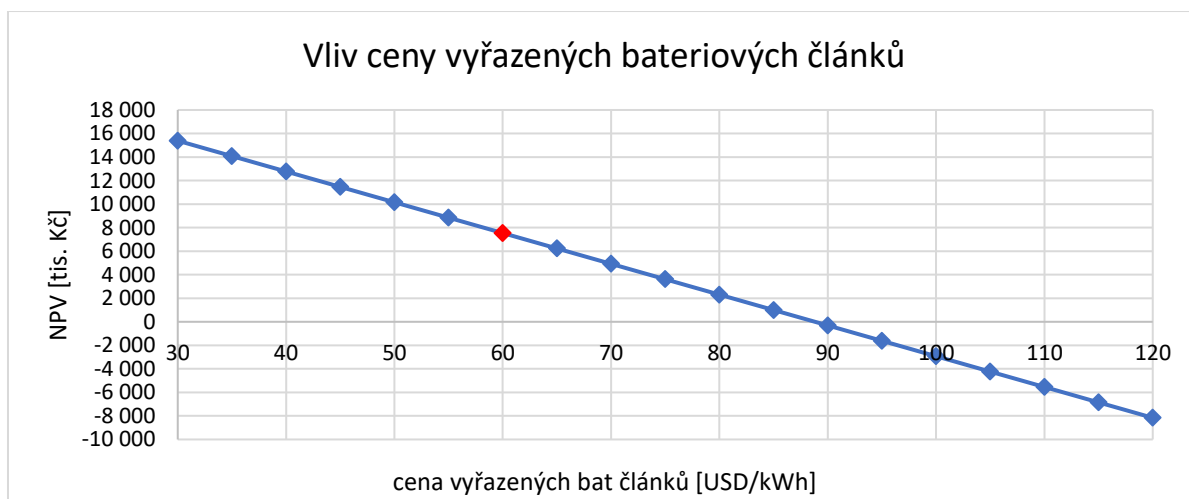
Graf 40 - Citlivostní analýza ekonomické efektivnosti investice na očekávaném výnosu SS-FCP2

Z této analýzy je patrné, že by se investice v případě budoucího vývoje dle zmíněného scénáře stala ekonomicky nerentabilní až při hodnotě očekávaného výnosu 13 %. Průměrná výnosnost investic v oblasti OZE a moderní energetiky se pohybuje kolem hodnoty 7 až 8 %. Vzhledem k nastaveným vstupním parametrům tento výsledek hodnotím jako velice uspokojivý.



Graf 41 - Citlivostní analýza ekonomické efektivity investice na výši provozních nákladů SS-FCP2

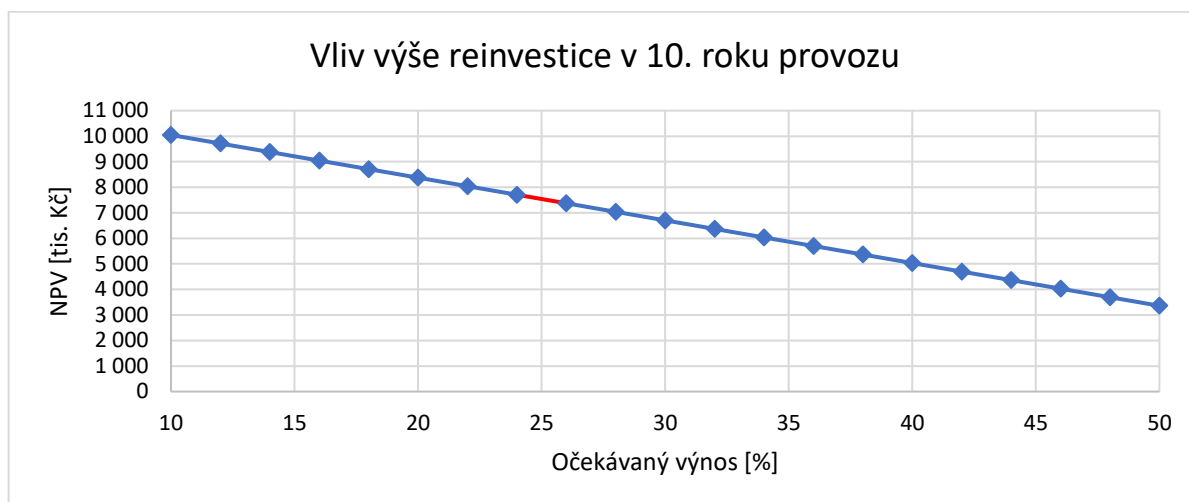
Z citlivostní analýzy závislosti NPV na provozních nákladech jasně vyplývá, že jejich nárůst by mohl do budoucna silně ovlivnit ekonomičnost této investice. Bateriová úložiště jsou však obecně chápána jako technologie téměř bezúdržbová a málo poruchová a proto nepředpokládám, že by provozní náklady překročily stanovenou hodnotu 2 %. Dále je třeba zdůraznit, že do provozních nákladů nejsou započteny opravy a výměny bateriových článků.



Graf 42 - Citlivostní analýza ekonomické efektivity investice na ceně vyřazených baterií SS-FCP2

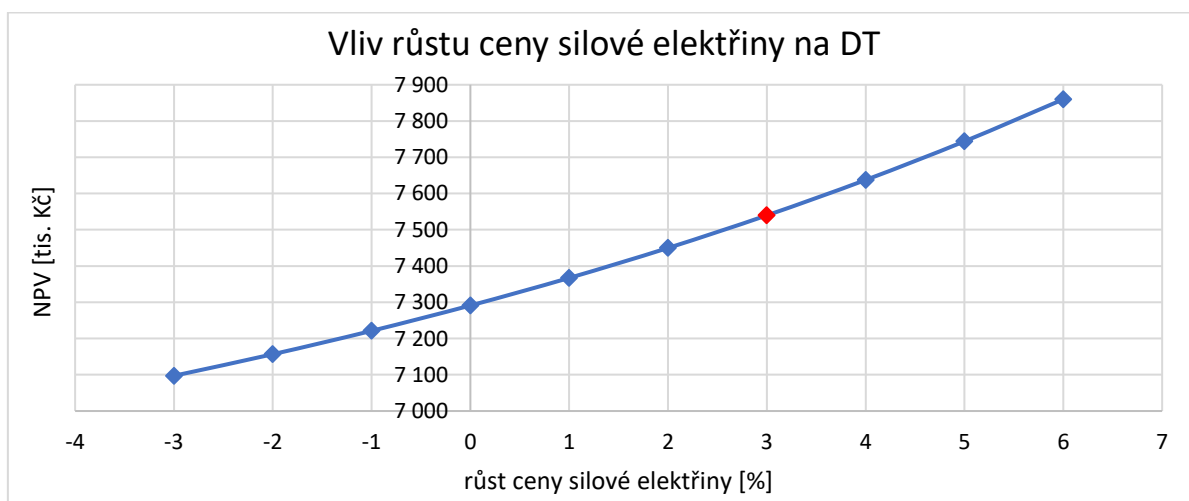
Požizovací cena vyřazených sekundárních bateriových článků ovlivňuje jak výši prvotní investice, tak výši nákladů na výměnu vadných článků během provozu. Výstavba BESS je uvažována v roce 2020. V tomto roce je dle předešlých analýz odhadovaná cena nových baterií 140 USD/kWh. Je však nepravděpodobné, že by se ceny vyřazených bateriových článků blížily této hodnotě. V roce 2020 bude

trh a využívání 2nd life bateriových článků stále ve zrodu, a proto je zde předpoklad nižší poptávky, což zapříčiní nižší cenu těchto baterií.



Graf 43 - Citlivostní analýza ekonomické efektivity investice na výši reinvestice v 10. roku provozu SS-FCP2

Jak je patrné, tak vliv výše reinvestice v 10. roce má také relativně silný vliv na celkový ekonomický výsledek investice. Jelikož bude docházet pouze k výměně měničů a řídicích jednotek, nikoliv k výměně transformátorů, VN a NN rozvaděčů, není zde velká pravděpodobnost překročení stanovené výše 25 %. I v případě, že by bylo v 10. roce vynaloženo na výměnu těchto součástí 50 % z výše prvotní investice, a to i s respektováním nominálního růstu cen, byla by investice stále ekonomicky rentabilní.



Graf 44 - Citlivostní analýza ekonomické efektivity investice na růstu cen silové elektřiny na DT SS-FCP2

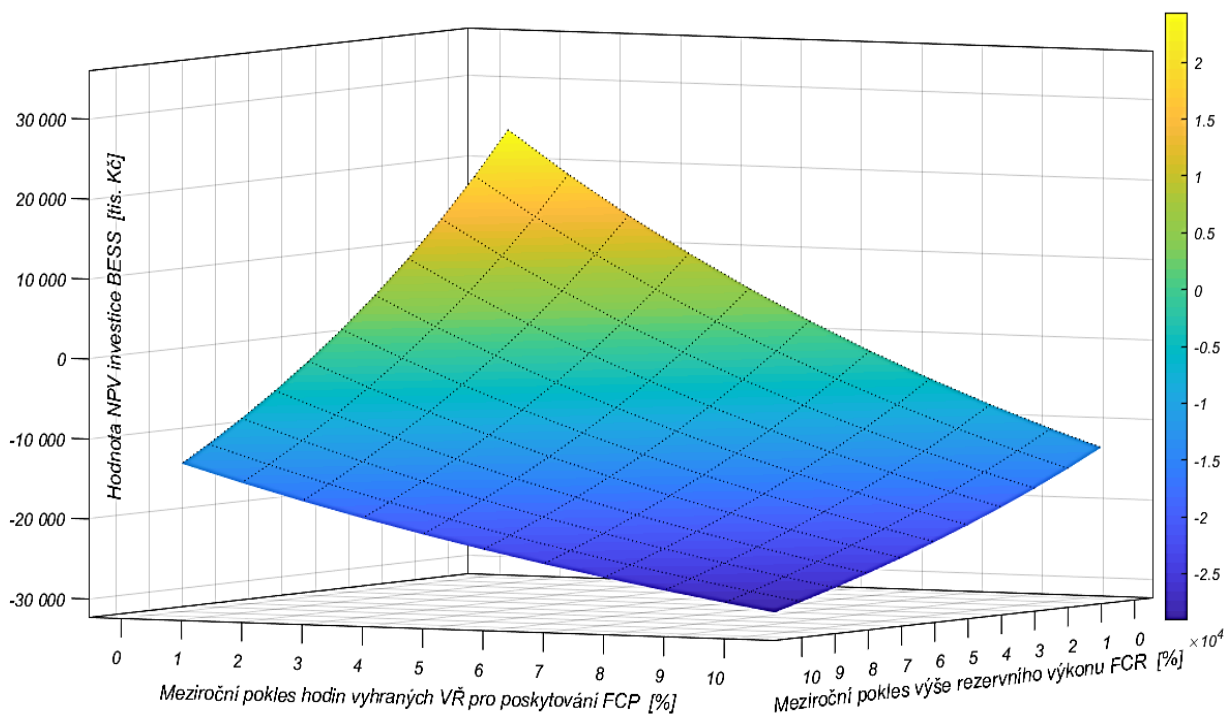
Vliv růstu ceny silové elektřiny do budoucna na ekonomičnost provozu BESS byl pro mne malým překvapením, jelikož jsem předpokládal, že nárůst ceny bude mít spíše negativní vliv. Růst průměrné ceny silové elektřiny naopak zvyšuje celkovou výnosnost této investice během let. Tento jev je zapříčiněn tím, že odchylka frekvence je častěji kladná, a tudíž BESS energii ze sítě spíše odebírá. Následně však dle strategie balancování SoC se musí BESS vybíjet, a tedy tuto elektrickou energii ve vhodný čas zpětně prodat. I přesto, že prodejní cena silové elektřiny byla v návaznosti na princip

opatrnosti stanovena na hodnotu 50 % z ceny nakupované silové elektřiny, stále je BESS před nárůstem ceny silové elektřiny za aktuálního stavu chráněna. Zlom by mohl nastat, pokud by začala v ES v České republice převládat záporná odchylka frekvence a BESS by musela více energie dodávat a tím pádem i nakupovat. Poté by byl vliv nárůstu ceny silové elektřiny na ekonomičnost provozu BESS negativní.

8.1. Citlivostní analýza provozních stavů BESS

Pro co nejrelevantnější rozhodování, zdali projekt BESS realizovat, je absolutně nutné zhodnotit i závislost ekonomického výsledku investice v závislosti na změnách provozních stavů. Běžně se do této kapitoly citlivostních analýz zahrnuje např. působení ročních období, které nám ovlivňuje výrobu, tedy využití naší instalované kapacity. V mém případě bude ekonomičnost provozu BESS nejvíce ovlivněna úspěšností ve velikosti vysoutěžené poskytované rezervy výkonu a dále skutečným počtem hodin, kdy se budou na poskytování FCP podílet. Tyto dva parametry hodnotím jako relativně provázané, jelikož oba budou závislé na aktuální situaci vývoje na trhu se SVR a vlivu propojování trhů v EU platformu. Z tohoto důvodu již nebudu k této analýze přistupovat jako k jednoparametrické citlivostní analýze, ale budu zkoumat vliv těchto dvou parametrů skrze jejich neizolovaný vliv na výslednou hodnotu NPV s využitím metody scénářů. Touto citlivostní analýzou budu schopen nalézt nejhorší možný scénář vývoje, kdy by se ještě investice do BESS pro potřeby SVR ekonomicky vyplatila.

Na následujícím grafu je vyobrazena závislost NPV na budoucích možných změnách provozních stavů BESS. Tato analýza počítá s maximálním počtem vysoutěžených hodin výběrového řízení na poskytování služby FCP a s maximální velikostí poskytnuté rezervy FCR v 1. roce. Následně je zkoumán vliv meziročních poklesů obou parametrů na ekonomičnost provozu BESS.



Graf 45 - Citlivostní analýza provozních stavů BESS (poklesů FCR a hodin participace na FCP)

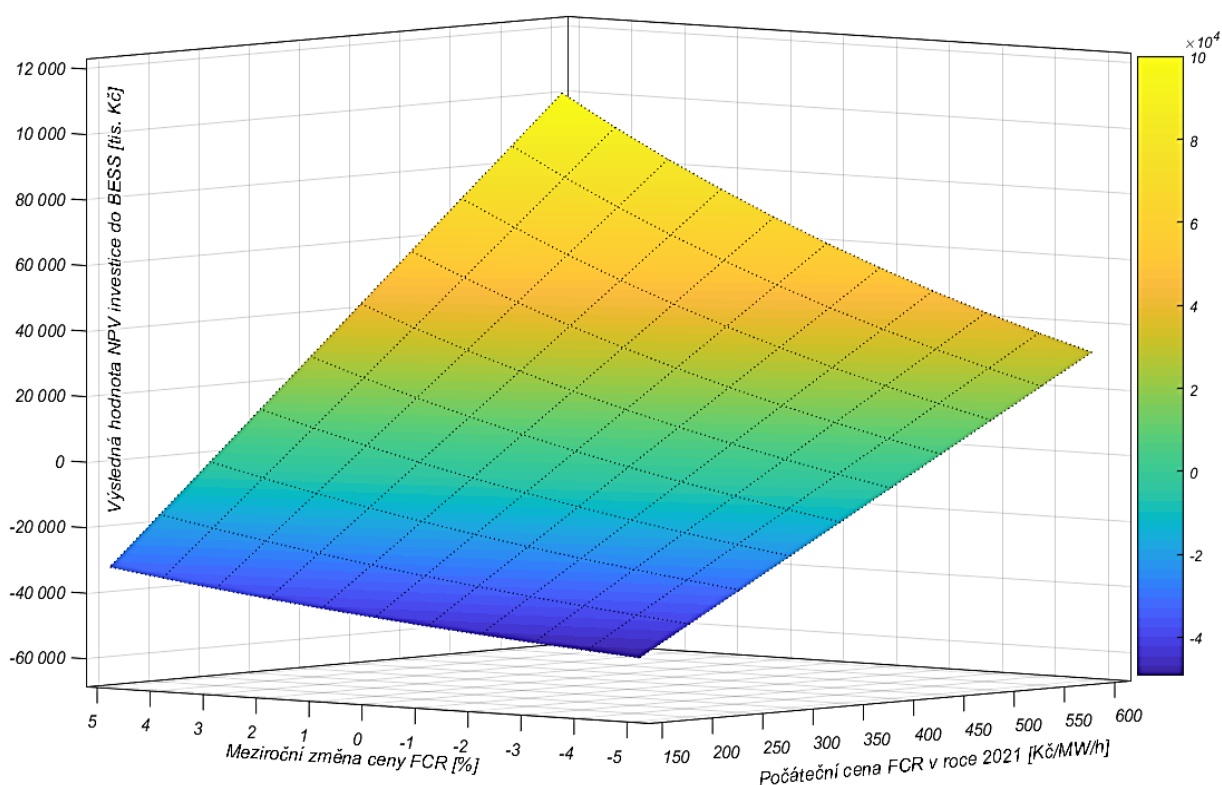
Dle této citlivostní analýzy byly identifikovány limitní kombinace hodnot vstupních parametrů pro zachování rentability projektu dle stanovených požadavků na jeho výnosnost.

Tabulka 28 - Mezní kombinace hodnot mezeročních poklesů parametrů

Limitní hodnoty poklesů parametrů pro zachování rentability investice do BESS						
pokles hodin VŘ [%]	5	4	3	2	1	0
pokles velikosti FCR [%]	0	1	2	3	4	5

8.2. Citlivostní analýza ceny výkonové rezervy

Stanovení výše ceny FCR a jejího budoucího vývoje je velice obtížné, avšak cena poskytované rezervy bude nejkritičtějším parametrem pro výslednou ekonomičnost provozu BESS poskytující FCP. V předešlých kapitolách jsem z tohoto důvodu sestavil tři scénáře vývoje výše plateb za poskytovanou výkonovou rezervu. I když byl možný vývoj ceny FCR diskutován s odborníky ze společností ČEPS a AKU-BAT i s přihlédnutím na budoucí nařízení v oblasti konvenčních zdrojů a ukončování jejich provozu, jedná se stále jen o pouhý odhad a realita se může značně lišit. Z tohoto důvodu jsem se rozhodl udělat podrobnější citlivostní analýzu na počáteční výši platby za FCR v roce 2021 a její možný variabilní vývoj. Citlivostní analýza tedy pracuje opět s dvěma vzájemně se ovlivňujícími parametry, a to s výší počáteční platby za FCR a mezeroční změnou této platby během doby životnosti BESS. Ostatní parametry vstupující do ekonomického modelu byly pro účely této analýzy nastaveny na hodnoty dle základního středního scénáře.



Graf 46 - Citlivostní analýza variantních vývoji výší plateb za FCR

Stejně jako v předešlé kapitole, která zkoumala vliv změny provozních stavů BESS, tak i z výsledků této citlivostní analýzy stanovím mezní hodnoty kombinací zkoumaných vstupních parametrů ekonomického modelu, kdy bude ještě stále zachována ekonomická rentabilita uvažovaného projektu.

Tabulka 29 - Mezní kombinace hodnot parametrů výše platby za FCR

Limitní kombinace hodnot vstupních parametrů ovlivňující výši platby za FCR během doby životnosti projektu											
Výše platby FCR 2021 Kč/MW/h]	450	425	400	375	375	350	350	325	300	275	250
Meziroční změna platby [%]	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5

9. Závěrečná doporučení a diskuze

Dle sestaveného technickoekonomického modelu provozu bateriového úložiště pro účely poskytování regulační výkonové zálohy pro automatickou regulaci frekvence v síti a výsledků základních ekonomických ukazatelů stanovuji **investici do této aplikace jako ekonomicky rentabilní**. Dle matematického modelu, který pracuje s reálnými historickými daty naměřených hodnot frekvence v ES a dodržuje všechny požadavky na participaci bateriové akumulace na této službě je patrné, že všechny okolnosti plynoucí z provozu baterie jsou pro jejich technické požadavky téměř ideální a není zde žádný důvod, aby nebyly baterie k tomuto účelu v nejbližší budoucnosti využívány.

Pro nejpravděpodobnější scénář, který je reprezentován základním středním scénářem a scénářem vývoje cen FCR – FCP 2, je možno na základě provedených citlivostních analýz stanovit několik možných budoucích rizik. **Nejvyšší vliv na výslednou ekonomičnost provozu bude mít průměrná výše platby za poskytnutou FCR a počet úspěšně vyhraných hodinových tendrů na poskytování služby FCP**. Tyto parametry s sebou přináší riziko jejich poklesu z důvodu silné konkurence v oblasti poskytování SVR vlivem vysokého nárůstu akumulace pro participaci v tomto sektoru, který se aktuálně jeví pro investory jako ekonomicky velmi lákavý. Před tímto rizikem by mohlo být mnou navrhnuté bateriové úložiště chráněno tím, že je složeno z pěti oddělených akumulačních jednotek o kapacitě 2 MWh a jmenovitém výkonu 1 MW, jež jsou schopny pracovat i samostatně. Tyto jednotky disponují kvalitním čtyřkvadrantovým měničem, který je schopen dle svých technických parametrů měnit plynule celkový zdánlivý výkon BESS dodávaný či odebíraný ze sítě. Tato skutečnost rozšiřuje možné portfolio nabízených služeb BESS o poskytování sekundární regulace U/Q a v případě dlouhodobé neúspěšnosti ve výběrovém řízení by mohlo dojít k využití části kapacity a výkonu právě pro účely regulace napětí. Potřeba této služby bude dle mých předpokladů v budoucnu narůstat v návaznosti na zvyšující se vliv kapacitního charakteru mnoha odběrových míst v DS.

Posledním velkým rizikem pro aplikaci BESS v prostředí české energetické soustavy by mohla být změna charakteru, počtu a velikostí odchylek frekvence. Aktuálně je česká přenosová soustava stále přebytková a po většinu času je v síti kladná odchylka frekvence. Z tohoto důvodu je vyžadováno v rámci služby FCP aktivace záporné výkonové rezervy. Tento stav znamená pro bateriovou akumulaci

děj, kdy energii ze sítě odebírá a tím se baterie dobíjí. Bateriová akumulace tak získává elektrickou energii, která může být následně pro účely řízení hladiny nabití článků prodávána buď vhodné protistraně či nebo v rámci trhu s elektrinou. V případě násilného a předem nepromyšleného uzavírání konvenčních spalovacích zdrojů a rychlého přechodu k obnovitelným zdrojům energie se budeme čím dál častěji setkávat spíše s nedostatkem elektrické energie. Tento možný vývoj může přinést stav v ES, kdy bude odchylka frekvence častěji negativní a bude vznikat požadavek na dodávání elektrické energie z bateriového úložiště. Tento fakt bude negativně ovlivňovat ekonomický výsledek investice i objem potřeby nakupované elektrické energie na DT. V tomto případě však již nebude největším problémem snižování ekonomické rentability samotného projektu BESS, ale celkově nevyvážený stav výroby a spotřeby, nejistota dodávky energie a v neposlední řadě stabilita ES. Proto je pro energetickou bezpečnost ČR i EU naprosto kritické zachování vyváženého, diverzifikovaného a silného energetického mixu, který potřebuje jak nové a čisté moderní technologie výroby energie, tak stabilní silné konvenční zdroje.

Dle všech předešlých praktických i technických poznatků mohu konstatovat fakt, že bateriová úložiště energie díky jejich specifickým technickým parametrům čeká velice slibná budoucnost. **Sektor bateriových úložišť a akumulace obecně se stane jedním z hlavních pilířů úspěšné a plynulé transformace energetiky** od využívání klasických fosilních paliv k obnovitelným a šetrným zdrojům energie, které jsme již v současnosti svědky. Rychlý nárůst velkého počtu nově instalovaných bateriových úložišť bude mít však stále i svá negativa a bude na současné i budoucí legislativě, jak si s nově vznikajícím silným odvětvím energetiky poradí. Bude třeba pevně stanovit jakou roli budou hrát tyto „zdroje“ v budoucí energetické soustavě a bude potřeba jasně vymezit pojmy a s nimi související práva a povinnosti provozovatelů akumulací. Jedním z velkých budoucích rizik instalací nových akumulčních zařízení by se mohl stát negativní vliv na výslednou kvalitu elektrické energie v síti, zejména při připojování na napět'ové hladiny DS. Zde je nárůst instalované kapacity bateriových úložišť předpokládán v největší míře. Z tohoto důvodu by mohl nastat spíše opačný efekt a to ten, že bateriové systémy akumulace napomůžou plynulejšímu chodu v místě instalace či optimalizaci spotřeby elektrické energie, ale celkově by mohla decentralizovaná bateriová akumulace znamenat spoustu dodatečných nákladů zejména pro provozovatele distribučních sítí. Z tohoto důvodu je nutno provést potřebné studie dopadů možných scénářů vývoje instalované kapacity akumulace a být na ně dostatečně dopředu připraveni.

10. Závěr

V této diplomové práci jsem se zabýval zkoumáním nově vznikající oblasti moderní energetiky, a to myšlenkou využívání vyřazených bateriových článků ze sektoru elektromobility. Tato myšlenka je ve světě obecně známa jako tzv. second life of batteries. Zájem o zkoumání a využívání vyřazených bateriových článků nabírá v posledních letech zejména na akademické půdě velké popularity. Vznik snahy o vdechnutí druhého života již použitým bateriovým článkům je připisován celosvětovému úsilí o minimalizaci odpadu a spotřeby surovin v rámci všech výrobních procesů v návaznosti na aktuálně zaváděné cirkulační hospodářství s cílem dosažení udržitelného rozvoje. Většina myšlenek a studií zabývajících se touto problematikou zůstává však stále pouze v teoretické rovině a neopírá se o mnoho reálných poznatků z praxe, aplikací či průběžného měření. Z těchto důvodů, jsem si za hlavní cíl mé diplomové práce stanovil nalezení odpovědi na otázku: „*Jsou tyto vyřazené bateriové články doopravdy vhodné k dalšímu použití v reálných energetických aplikacích vzhledem k jejich technickému stavu a je jejich případné nasazení do vhodných aplikací ekonomicky rentabilní za stávajících legislativních podmínek v České republice?*“ Pro úspěšné nalezení odpovědi na tuto otázku a co největší reálnost a důvěryhodnost zjištěných skutečností bylo zapotřebí podrobně analyzovat několik specifických oblastí moderní energetiky. Těmto prvotním analýzám a zjišťování aktuálního stavu rozvoje jednotlivých oblastí byla věnována teoretická část mé práce.

Idea dalšího využívání vyřazených bateriových článků a jejich nasazení do energetických aplikací pracuje s předpokladem toho, že naprostá většina těchto článků bude pocházet ze sektoru elektromobility. Z tohoto důvodu byla první úvodní kapitola teoretické části věnována právě zkoumání oblasti elektromobility a jejímu aktuálnímu rozvoji v EU, České republice a jejich kritickému porovnání. Hlavním zjištěním, ke kterému jsem se chtěl v této kapitole dopracovat, bylo to, zdali budeme do budoucna disponovat dostatečným počtem vyřazených baterií, jež budeme moci dále využívat v rámci konceptu second life. Pro ověření budoucí dostupnosti dostatečného počtu vyřazených baterií byl analyzován hlavní legislativní rámec, plány a cíle EU zaštiťující narůstající podíl elektrických vozidel ve vozových parcích jednotlivých zemích. Jako jednoznačný ukazatel toho, že se elektromobilita bude v rámci EU v následujících letech i nadále velice dynamicky rozvíjet, byl analyzován parametr vycházející z Nařízení Evropského parlamentu a rady (ES) č. 443/2009 ze dne 23. dubna 2009, a to výkonnostní emisní limity tzv. limity EURO. Tyto limity jsou nastavovány Evropským parlamentem tak striktně, že jsou výrobci automobilů nuceni přecházet k vývoji a výrobě elektrických vozidel či různých kombinací elektrických a spalovacích pohonů v podobě hybridních elektrických vozidel. Na základě zjištěných skutečností v této kapitole byl sestaven matematický model, který predikuje pravděpodobný vývoj celkové kapacity využívaných bateriových článků, která koreluje s vývojem absolutního počtu elektrických vozidel v rámci vozového parku v segmentu osobních automobilů v ČR. Dle tohoto sestaveného scénáře jsem aplikováním průměrné doby životnosti 8 let bateriového systému

v elektromobilu došel k závěru, že první větší kapacita vyřazených baterií bude v ČR z lokálních automobilů bude dostupná na trhu kolem roku 2025. Tato vyřazená kapacita by měla v tomto roce dosáhnout hranice 1 GWh. Při optimálním vývoji elektromobility a neměnné době životnosti baterií bude v roce 2035 k dispozici kumulovaná vyřazená kapacita zhruba ve výši 10 GWh. Závěrem této kapitoly mohu konstatovat, že do budoucna bude vyřazených baterií dostatek a základní vstup pro myšlenku sekundárního využití bude zajištěn.

Po ověření budoucího dostatku vyřazených baterií se objevila další naprosto kritická otázka, na kterou bylo nutno nalézt co nejvíce korektní odpověď. Tato otázka je následující: „*Jsmo vážně schopni vyřazené bateriové články i nadále využívat po tom, co je vyřadíme z provozu elektromobilu a nejedná se pouze o teoretickou úvahu?*“ Hledáním odpovědi na tuto otázku jsem se zaměřil v navazujících dvou kapitolách teoretické části. Nejprve jsem provedl analýzu aktuálně využívaných technologií bateriových článků v oblasti elektromobility, kde bylo zjištěno, že za aktuální situace se na evropském trhu s elektrickými vozy využívá výhradně Lithium-iontové technologie baterií, a to zejména čtyř typů, které se od sebe liší dle využitého materiálu katody, tedy dle chemie katody. Mezi tyto využívané chemie bateriových článků se aktuálně řadí baterie chemií NMC, NCA, LFP a LMO. Jelikož bylo zjištěno, že jednotlivé chemie bateriových článků mají odlišné vlastnosti a technické parametry, byla provedena podrobná analýza základních technických a ekonomických parametrů, které byly předem definovány a popsány. Na základě této analýzy a srovnání vlastností odlišných chemií bateriových článků byly identifikovány jejich výhody a nevýhody. Bylo zjištěno, že aktuálně nejvyužívanější technologií je chemie NMC, která je také dle parametru cena za počet cyklů a kWh nejlevnější technologií. Výstupem tohoto zkoumání byl základní předpoklad, že ve stacionárních energetických aplikacích, kde je klíčovým parametrem objem uskladňované energie, najdou využití zejména technologie baterií NMC a NCA. Naopak v aplikacích, které kladou důraz na vysoké výkony dodávané v krátkých časech, naleznou využití technologie LFP a LMO, a to díky své vysoké bezpečnosti, tepelné odolnosti a stabilitě.

V následující kapitole byl popsán a vytvořen diagram podrobného životního cyklu baterií již v návaznosti na myšlenku sekundárního využití. Dále byly definovány limitní hodnoty technického stavu bateriového článku během jeho životního cyklu, které určují jak a zdali bude baterie dále využívána. Tyto limitní hodnoty byly interpretovány skrze tzv. SoH parametr, tedy doslova “zdravotní stav“ bateriového článku. Tento ukazatel hraje v celém cyklu sekundárního života nejdůležitější roli a pro jeho hlubší pochopení byla provedena analýza a popis procesu degradace bateriového článku vlivem dvou základních principů, a to vlivem okolností uskladnění baterie a vlivem okolností provozu baterie, tedy vlivem počtu cyklů a provozních podmínek jako je okolní teplota, vybíjecí a nabíjecí výkon či jízdní profil při užívání elektromobilu. Bylo zjištěno, že celkový stav degradace bateriového článku by neměl být pro budoucí využití těchto baterií překážkou. Byly analyzovány pouze omezující podmínky v návaznosti na navýšenou hodnotu vnitřního odporu baterie vzhledem k možným bezpečnostním rizikům a vznikl tak předpoklad toho, že by tyto bateriové články neměly být nasazovány v náročných

aplikacích za náročných provozních podmínek jako je vysoká či nízká teplota nebo abnormálně vysoké vybíjecí výkony. Dále byly definovány optimální provozní podmínky těchto baterií, které budou důležité při výběru vhodné aplikace. Baterie by měla být provozována v oblasti lineární části vybíjecí a nabíjecí křivky, při teplotách okolo 20 °C a její vybíjecí a nabíjecí výkon by neměl přesahovat hodnotu 1C rate, což znamená, že se z plné kapacity baterie zcela vybije konstantním výkonem během jedné hodiny.

V závěru teoretické části jsem se zaměřil na možné aplikace, ve kterých by se mohly tyto vyřazené baterie začít využívat. Bateriová úložiště energie a akumulace obecně budou hrát bezesporu v budoucí flexibilní a dynamicky reagující energetice dle mého názoru majoritní roli. Z tohoto důvodu bude pole uplatnění těchto baterií velice široké i s respektováním jejich omezujících podmínek plynoucích z technického stavu. Jako hlavní oblasti nasazování těchto baterií byly analyzovány aplikace jako bateriová úložiště pro podporu chodu soustavy, regulaci frekvence a napětí v síti, kooperace s OZE a zvýšení jejich říditelnosti a v neposlední řadě také jejich využití k energetické a cenové arbitráži. Vzhledem k těmto oblastem, které jsou charakteristické pro využívání bateriových úložišť velkokapacitního charakteru, byla analyzována aktuální legislativa týkající se tohoto sektoru moderní energetiky v ČR. Byl zjištěn aktuálně nevyhovující stav české legislativy, který je v rozporu s evropskými plány a nařízeními. Z tohoto důvodu jsem identifikoval a stanovil do budoucna několik zásadních kroků, které musí být realizovány, aby došlo k plnému otevření trhu se SVR akumulací a jejímu vyhovujícímu ukotvení v legislativě. Jako osobní předpoklad jsem stanovil rok 2022 jako rok, kdy budou v ČR moderní akumulční technologie legislativně postaveny jako rovnocenné současným technologiím využívaných v energetice. Závěrem celé teoretické části mé práce je rozhodnutí, že aktuálně nejvhodnější aplikací vyřazených baterií vzhledem ke všem zjištěným skutečnostem a předpokladům jak z pohledu ekonomického, tak technického je jejich využití pro poskytování služby primární regulace frekvence sítě, nově dle kodexu ČEPS též pro službu FCP.

Praktická část je věnována detailnímu návrhu a modelování činnosti sekundárního velkokapacitního bateriového úložiště při poskytování primární regulace frekvence. Na začátku jsem si stanovil metodiku, kterou bude komplexní funkční technicko-ekonomický model BESS vyhotoven. Jádrem celé praktické části je matematický model reprezentující roční provoz bateriového úložiště, který jsem sestavil v programovacím prostředí programu MATLAB. Nejdříve jsem identifikoval a vymezil omezující podmínky tohoto modelu, které vychází z aktuální legislativy na poli trhu s balanční energií, a to jmenovitě dokumenty EU, SOGL a EBGL, které vymezují podmínky pro participaci bateriové akumulace na službách zajišťujících stabilitu sítě. Tyto podmínky aktuálně korelují s požadavky na poskytovatele služby regulace frekvence v Německu a z tohoto důvodu jsem založil provozní strategii pro udržování optimální a dovolené hladiny nabití úložiště na jejich požadavcích. Ověření správné funkčnosti navržené strategie řízení provozu bateriového úložiště jsem provedl s využitím historických dat odchylek frekvence v české přenosové soustavě. Chod BESS byl následně porovnán při aktivované

komplexní strategii řízení a bez aktivované strategie, během dnů maxima a minima zatížení v soustavě, což jsou dny pro řízení soustavy náročné. Aplikací těchto dat bylo dále zjištěno, že je česká přenosová soustava stále přebytková, což znamená, že je v rámci služby FCP během roku aktivována záporná výkonová záloha, což za využití bateriové akumulace znamená její nabíjení, a tedy odebrání energie ze sítě. Tento aktuální stav je pro využívání omezených zdrojů jako je bateriová akumulace vhodnější než případný stav, kdy by bylo energie v síti po většinu času spíše nedostatek.

Dle legislativních požadavků, analýzy chování bateriového úložiště vycházející z matematického modelu a jeho celkové degradace během roků v provozu při poskytování regulace frekvence v síti jsem provedl odpovídající technický návrh systému, který po všech stránkách vyhovuje danému účelu. V návaznosti na poznatky z teoretické části byla zvolena technologie bateriových článků NMC. Navržený bateriový systém bude připojen po souhlasu PDS na napěťovou hladinu 22 nebo 35 kV a disponuje celkovou kapacitou 10 MWh, jmenovitým výkonem 5 MW a je rozdělen do 5 totožných bateriových kontejnerů. Celková výše prvotní investice navrhnutého úložiště činila 62,5 milionu Kč.

Výše prvotní investice byla prvním vstupem do poslední části komplexního modelu provozu BESS, a to do ekonomického modelu provozu. Pro objektivní vyhodnocení ekonomičnosti provozu této investice bylo stanoveno mnoho předpokladů, většina byla v návaznosti na ekonomický princip opatrnosti lehce nadhodnocena. V rámci metodiky stanovení výsledné ekonomičnosti provozu a možných vývoje na trhu s podpůrnými službami v EU s přesahem na fungování českého trhu s PpS jsem navrhl tři základní scénáře vývoje, a to optimistický, střední a pesimistický. V rámci každého scénáře bylo počítáno se třemi možnými vývoji cen za poskytovaný rezervovaný výkon v rámci služby FCP. Za směrodatný výsledek ekonomické efektivity investice jsem stanovil výsledky základního středního scénáře, který počítá se středním scénářem (FCP2) vývoje cen poskytnutých rezerv na trhu s PpS. Hodnoty základních ekonomických ukazatelů (NPV = 7,5 mil. Kč, IRR = 12,3 %) v rámci tohoto scénáře ukazují na to, že se tato investice i přes relativně přísně nastavené vstupní parametry ekonomického modelu jeví jako ekonomicky rentabilní. Zmíněný výsledek respektující okolnosti středního scénáře jsem podrobil jednoparametrovým a dvouparametrovým citlivostním analýzám. Dvouparametrové citlivostní analýzy zkoumaly vliv změn provozních stavů BESS během let provozu a byly z nich identifikovány limitní kombinace hodnot zkoumaných parametrů pro zachování ekonomické rentability. V případě negativního vývoje na trhu se službami výkonové rovnováhy bylo mé bateriové úložiště technicky navrženo tak, aby bylo případně schopno poskytovat buď částečným anebo celkovým výkonem regulaci napětí v síti, tedy službu regulace U/Q.

Myšlenka sekundárního života bateriových článků a její technická reálnost byla úspěšně podrobně ověřena a osobně ji pro vhodné energetické aplikace identifikované v této práci považuji pouze za další optimální a možná až nutný krok na cestě k úspěšnému přechodu od centralizované energetiky směrem k lokálně řízené, flexibilní a k životnímu prostředí šetrné energetice budoucnosti.

Bibliografie

- [1] Centrum dopravního výzkumu, “STUDIE O VÝVOJI DOPRAVY Z HLEDISKA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ V ČESKÉ REPUBLICE ZA ROK 2016 STUDY ON TRANSPORT TRENDS FROM ENVIRONMENTAL VIEWPOINTS IN THE CZECH REPUBLIC 2016 Brno,” *Obl. dopravy a životního prostředí*, vol. Brno, 2017.
- [2] Ministerstvo průmyslu a obchodu, “Národní akční plán čisté mobility (NAP CM),” 2015. [Online]. Available: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/cista_mobilita_seminar/\\$FILE/SOPSZP-NAP_CM-20160105.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/cista_mobilita_seminar/$FILE/SOPSZP-NAP_CM-20160105.pdf).
- [3] Ministerstvo životního prostředí ČR, “Národní Program Snižování Emisí,” 2017. [Online]. Available: https://www.mzp.cz/cz/strategicke_dokumenty.
- [4] Ministerstvo průmyslu a obchodu, “Státní energetická koncepce České republiky,” 2014.
- [5] European Commission, “NAŘÍZENÍ EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY (ES) č. 443/2009 ze dne 23. dubna 2009, kterým se stanoví výkonnostní emisní normy pro nové osobní automobily v rámci integrovaného přístupu Společenství ke snižování emisí CO₂ z lehkých užitkových vozidel,” 2009.
- [6] U. Tietge, “CO₂ emissions from new passenger cars in the EU : Car manufacturers’ performance in 2017,” *Int. Counc. Clean Transp.*, no. July, 2018.
- [7] ERÚ, “Roční zpráva o provozu ES ČR 2017,” *ERÚ, Oddělení Stat. a sledování kvality*, vol. Praha, 2018.
- [8] R. W. (USA) Thomas Bruckner (Germany), Lew Fulton (USA), Edgar Hertwich (Austria / Norway), Alan McKinnon (UK / Germany), Daniel Perczyk (Argentina), Joyashree Roy (India), Roberto Schaeffer (Brazil), Steffen Schlömer (Germany), Ralph Sims (New Zealand), Pete Smith (, “Technology-specific Cost and Performance Parameters,” *Clim. Chang. 2014 Mitig. Clim. Chang.*, pp. 1329–1356, 2014.
- [9] SNV Netherlands, “Country detail |,” *European Alternative Fuels Observatory*, 2018. [Online]. Available: <http://www.snv.org/country/nepal#projects>.
- [10] Ministerstvo průmyslu a obchodu, “Memorandum o budoucnosti automobilového průmyslu v ČR a Akční plán o budoucnosti automobilového průmyslu v ČR,” *Český automobilový průmysl*, 2017. [Online]. Available: <https://www.mpo.cz/cz/prumysl/zpracovatelsky-prumysl/automobilovy-prumysl/memorandum-o-budoucnosti-automobiloveho-prumyslu-v-cr-a-akcni-plan-o-budoucnosti-automobiloveho-prumyslu-v-cr---232552/>.

- [11] European commission, “Country detail incentives _ EAFO_Germany,” *countries germany*, 2018. [Online]. Available: <https://www.eafo.eu/countries/germany/1734/incentives#>.
- [12] International Energy Agency (IEA), “Global EV Outlook 2017: Two million and counting,” *IEA Publ.*, pp. 1–71, 2017.
- [13] F. Rieck *et al.*, “The transition to a Zero Emission Vehicles fleet for cars in the EU by 205. Pathways and impacts: An evaluation of forecasts and backcasting the COP21 commitments,” p. 87, 2017.
- [14] R. Tel, “Dílčí studie pro pracovní tým A25 - Predikce vývoje elektromobility v ČR.”
- [15] R. A. Hanifah, S. F. Toha, and S. Ahmad, “Electric Vehicle Battery Modelling and Performance Comparison in Relation to Range Anxiety,” *Procedia - Procedia Comput. Sci.*, vol. 76, no. Iris, pp. 250–256, 2015.
- [16] K. Young, C. Wang, L. Y. Wang, and K. Strunz, *Electric Vehicle Battery Technologies*. 2015.
- [17] G. Meyer, *Advanced Microsystems for Automotive Applications 2012 - Smart Systems for Safe, Sustainable and Networked Vehicles*. 2012.
- [18] R. Zhang, B. Xia, B. Li, L. Cao, Y. Lai, and W. Zheng, “State of the Art of Lithium-Ion Battery SOC Estimation for Electrical Vehicles,” 2018.
- [19] Battery University™, “Types of Lithium-ion Batteries – Battery University,” 2019. [Online]. Available: https://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion.
- [20] J. Julve, K. Im, and A. Des, “Second Life-Batteries As Flexible Storage For Renewables Energies,” *Bundesverband Erneuerbare Energ.*
- [21] G. Patry *et al.*, “Cost modeling of lithium-ion battery cells for automotive applications To cite this version : HAL Id : hal-01205560 Science Arts & Métiers (SAM),” 2017.
- [22] JRC Exploratory Research, “Sustainability Assessment of Second Life Application of Automotive Batteries (SASLAB),” 2018. [Online]. Available: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/743e967a-b187-11e8-99ee-01aa75ed71a1/language-en/format-PDF>.
- [23] Ministerstvo průmyslu a obchodu, “AKTUALIZACE POLITIKY DRUHOTNÝCH SUROVIN ČESKÉ REPUBLIKY PRO OBDOBÍ 2019 - 2022,” 2018. [Online]. Available: https://www.mpo.cz/assets/cz/prumysl/politika-druhotnych-surovin-cr/2019/1/IV_Politika-druhotnych-surovin-CR.pdf.
- [24] M. Romare and L. Dahllöf, *The Life Cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions*

from *Lithium-Ion Batteries and Batteries for light-duty vehicles*, no. Swedish Energy Agency, Swedish Transport Administration. 2017.

- [25] P. Keil, S. F. Schuster, P. Keil, S. F. Schuster, C. Von Lüders, and H. Hesse, “Lifetime Analyses of Lithium-Ion EV Batteries,” *3rd Electromobility Challenging Issues Conf.*, no. December, 2015.
- [26] B. A. García and L. V Cremades, “Electric Vehicle Battery Reuse : Preparing for a Second Life,” vol. 10, no. 2, pp. 266–285, 2017.
- [27] J. Cherry, “Battery Durability in Electrified Vehicle Applications : A Review of Degradation Mechanisms and Durability Testing Prepared for Environmental Protection Agency : Submitted by Thomas Merichko ;,” 2015.
- [28] D. Le and X. Tang, “Lithium-ion Battery State of Health Estimation Using Ah-V Characterization,” *Annu. Conf. Progn. Heal. Manag. Soc.*, pp. 1–7, 2011.
- [29] M. Murnane and A. Ghazel, “A Closer Look at State of Charge (SOC) and State of Health (SOH) Estimation Techniques for Batteries,” *Analog devices*, 2017.
- [30] J. S. Neubauer, E. Wood, and A. Pesaran, “A Second Life for Electric Vehicle Batteries : Answering Questions on Battery Degradation and Value,” no. April, pp. 21–23, 2015.
- [31] P. Keil, “Aging of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles,” vol. 7, pp. 1–186, 2017.
- [32] J. Travi *et al.*, “Calendar Aging of Lithium-Ion Batteries,” *J. Electrochem. Soc.*, vol. 163, no. 9, pp. A1872–A1880, 2016.
- [33] ČEPS, “PRAVIDLA PROVOZOVÁNÍ PŘENOSOVÉ SOUSTAVY-KODEX PŘENOSOVÉ SOUSTAVY,” *ČEPS, a.s.*, 2018. [Online]. Available: <https://www.ceps.cz/cs/kodex-ps>.
- [34] ČEPS, “KODEX PŘENOSOVÉ SOUSTAVY, Část II., Podpůrné služby (PpS), Základní podmínky pro užívání přenosové soustavy,” 2019. [Online]. Available: <https://www.ceps.cz/cs/kodex-ps>.
- [35] 13300 Dispečerské řízení 13200 Energetický obchod, “ROČNÍ PŘÍPRAVA PROVOZU na rok 2019,” *ČEPS, a.s.*, 2019. [Online]. Available: <https://www.ceps.cz/cs/priprava-provozu>.
- [36] R. Martins, H. C. Hesse, J. Jungbauer, T. Vorbuchner, and P. Musilek, “Optimal component sizing for peak shaving in battery energy storage system for industrial applications,” *Energies*, vol. 11, no. 8, 2018.
- [37] I. Renewable and E. Agency, *RENEWABLE-POWERED FUTURE : SOLUTIONS TO INTEGRATE. .*

- [38] EcoGeneration, “A month in Tesla’s SA battery is surpassing expectations,” 2018. [Online]. Available: <https://www.ecogeneration.com.au/a-month-in-teslas-sa-battery-is-surpassing-expectations/>.
- [39] V. UK, “Battery at Pen y Cymoedd - Vattenfall,” 2018. [Online]. Available: <https://group.vattenfall.com/>.
- [40] I. C. AEA, “Quality, innovation & sustainability,” 2018. [Online]. Available: <https://www.johancruiffarena.nl/organization/quality-innovation-sustainability.htm>.
- [41] European Economic and Social Committee, « *Clean Energy for All Europeans* » package. 2016.
- [42] Ministerstvo průmyslu a obchodu, “Národní akční plán pro chytré sítě 2019 - 2030 - Aktualizace NAP SG,” p. 140, 2019.
- [43] O. Souček, “Všem se vyplatí, aby podporu dostávaly jen menší solární instalace, říká náměstek pro energetiku Neděla,” 2019. [Online]. Available: <https://www.e15.cz>.
- [44] N. R. E. Laboratory, “Battery Second-Use Repurposing Cost Calculator NREL,” 2018. [Online]. Available: <https://www.nrel.gov/transportation/b2u-calculator.html>.
- [45] ENTSO-E, “Trans European Replacement Reserves Exchange (TERRE),” *WEB*, 2019. [Online]. Available: https://www.entsoe.eu/network_codes/eb/terre/.
- [46] ENTSO-E, “Manually Activated Reserves Initiative (MARI),” *WEB*, 2019. [Online]. Available: https://www.entsoe.eu/network_codes/eb/mari/.
- [47] ENTSO-E, “The Platform for the International Coordination of Automated Frequency Restoration and Stable System Operation (PICASSO),” *WEB*, 2019. [Online]. Available: https://www.entsoe.eu/network_codes/eb/picasso/.
- [48] ENTSO-E, “Frequency Containment Reserves (FCR),” *WEB*, 2018. [Online]. Available: https://www.entsoe.eu/network_codes/eb/fcr/.
- [49] ENTSO-E, “Transparency Platform,” 2019. [Online]. Available: <https://transparency.entsoe.eu/>.
- [50] ERÚ, “Cenové rozhodnutí Energetického regulačního úřadu č. 8/2015 ze dne 26. listopadu 2015, kterým se stanovují ceny za související službu v elektroenergetice odběratelům ze sítí nízkého napětí,” no. 6, 2016.
- [51] E. regulační Úřad, “Cenové rozhodnutí Energetického regulačního úřadu č. X / 2015 ze dne XX . listopadu 2015 , kterým se stanovují ceny za související službu v elektroenergetice a další regulované ceny,” 2015.
- [52] A. Zeh, M. Müller, M. Naumann, H. C. Hesse, A. Jossen, and R. Witzmann, “Fundamentals of

Using Battery Energy Storage Systems to Provide Primary Control Reserves in Germany,”
<https://www.mdpi.com/journal/batteries>, pp. 1–21, 2017.

- [53] J. Fleer, S. Zurmühlen, J. Badeda, P. Stenzel, J. F. Hake, and D. U. Sauer, “Model-based Economic Assessment of Stationary Battery Systems Providing Primary Control Reserve,” in *Energy Procedia*, 2016.
- [54] A. ENERGETICS, “Technické údaje BESS 1MWh EAE,” *ENERGON*, 2018. [Online]. Available: http://www.energon-ae.cz/pdf/1MWh_EAE_BESS_Kontejner_technicke_udaje_CZ.pdf.
- [55] TenneT Taking power further, “Developments and discussions regarding the FCR market framework,” 2018. [Online]. Available: https://www.tennet.eu/fileadmin/user_upload/SO_NL/Developments_and_discussions_regarding_FCR_market_framework_nov_2018_ENG.pdf.

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Složení akumulátoru v elektromobilu [17].....	23
Obrázek 2 - Oběhové hospodářství a udržitelné využívání zdrojů [23].....	29
Obrázek 3 - Vývojový diagram životního cyklu baterií dle cirkulačního hospodářství.....	30
Obrázek 4 - Základní princip degradace baterií v xEV.....	33
Obrázek 5 - Vliv DoD na pokles kapacity baterie [31].....	37
Obrázek 6 - Jízdní profil zatížení EV baterie [31].....	38
Obrázek 7 - Degradace baterií vlivem rekuperačního brzdění a profilem jízdy [31].....	38
Obrázek 8 - Využití BESS pro omezování odběrových špiček na straně velkoodběratele.....	47
Obrázek 9 - Pracovní diagram bateriového úložiště Hornsdale za prosinec 2017 [38].....	52
Obrázek 10 - průběh certifikačního testu služeb mFRPt [34].....	59
Obrázek 11 - Aktuální členové projektu FCR cooperation ENTSO-E [48].....	66
Obrázek 12 - Znázornění metodiky vypracování komplexního modelu BESS pro poskytování FCR .	72
Obrázek 13 - Strategie pro řízení a korekci SoC během poskytování FCP.....	79
Obrázek 14 - Vývojový diagram modelu provozu BESS při FCP.....	81
Obrázek 15 - Nastavení vstupních proměnných pro simulaci provozu BESS v prostředí MATLAB ..	82
Obrázek 16 - Fyzické toky elektrické energie během poskytování FCP BESS.....	84
Obrázek 17 - Objemy regulační energie dodané v rámci FCP během let.....	85

Seznam grafů

Graf 1 - Složení osobních motorových vozidel v ČR [1]	1
Graf 2 - Průměrné emise vozových parků automobilových koncernů v EU	6
Graf 3 - Uhlíková stopa provozu vozidel xEV ve vybraných zemích EU [gCO ₂ /km]	9
Graf 4 - Historický vývoj počtu registrovaných elektromobilů v ČR	10
Graf 5 - Vývoj počtu xEV v zemích s největším podílem na elektromobilitě v EU	11
Graf 6 - Vývoj TCO v závislosti na ceně baterií	16
Graf 7 - Predikce vývoje vozového parku v EU	17
Graf 8 - Budoucí vývoj počtu xEV v ČR dle scénářů	20
Graf 9 - Odhad budoucí hodnoty kapacit baterií EV v ČR	21
Graf 10 - Porovnání energetické hustoty bateriových technologií	26
Graf 11 - Aktuální cena baterií dle technologie	27
Graf 12 - Porovnání vlastností technologií bateriových článků	28
Graf 13 - Degradace baterií v čase	34
Graf 14 - Změna vnitřního odporu baterie v čase	35
Graf 15 – Nabíjecí charakteristika NCA bateriového článku [25]	36
Graf 16 - Statická charakteristika korektury frekvence jednotky FCP	43
Graf 17 - Zvyšování maximální přenosové kapacity uzlu DS	46
Graf 18 - Souvislost proměnlivé výroby FVE s potřebou RE v ES ČR	49
Graf 19 - Aplikace BESS u FVE zdrojů a funkce dynamického omezení	50
Graf 20 - Profil zatížení spojení BESS a dobíjecí stanice pro EV	51
Graf 21 - Možné scénáře vývoje ceny vyřazených baterií v ČR	62
Graf 22 - Historický vývoj plateb za rezervovaný výkon PpS v České republice	64
Graf 23 - Predikce možného budoucího vývoje průměrných plateb za rezervy SVR	68
Graf 24 - Historické průměrné marginální ceny silové elektřiny na DT v ČR	69
Graf 25 - Rozložení četností odchylek frekvence v ES za rok 2018	73
Graf 26 - Průběh frekvence během dne maximální kladné odchylky v roce 2018	74

Graf 27 - Průběh SoC BESS v návaznosti na aktivace služby FCP během dne maximální kladné odchylky v roce 2018.....	74
Graf 28 - Průběh frekvence během dne maximální záporné odchylky v roce 2018	75
Graf 29 - Průběh SoC BESS v návaznosti na aktivace služby FCP během dne maximální záporné odchylky v roce 2018	75
Graf 30 - Dovolená pracovní oblast SoC BESS při PCR v Německu.....	77
Graf 31 - Povolené strategie při participaci BESS během poskytování PCR (FCR) v Německu	78
Graf 32 - Nabíjecí a vybíjecí charakteristika NMC a NCA bateriového článku.....	79
Graf 33 - Porovnání vlivu aktivace strategie řízení SoC BESS během dne maximální kladné odchylky f v roce 2018.....	82
Graf 34 - Porovnání pracovních charakteristik pro proces aktivního řízení SoC a bez něho.....	83
Graf 35 - Využití strategie korektivní energie k obnově SoC po dosažení limitní hodnoty	83
Graf 36 - Průběh degradace bateriového článku v závislosti na počtu EFC	86
Graf 37- Kumulovaný DCF optimistický scénář	94
Graf 38 - Kumulovaný DCF střední scénář.....	95
Graf 39 - Kumulovaný DCF pesimistický scénář	96
Graf 40 - Citlivostní analýza ekonomické efektivity investice na očekávaném výnosu SS-FCP2....	97
Graf 41 - Citlivostní analýza ekonomické efektivity investice na výši provozních nákladů SS-FCP2	98
Graf 42 - Citlivostní analýza ekonomické efektivity investice na ceně vyřazených baterií SS-FCP2	98
Graf 43 - Citlivostní analýza ekonomické efektivity investice na výši reinvestice v 10. roku provozu SS-FCP2.....	99
Graf 44 - Citlivostní analýza ekonomické efektivity investice na růstu cen silové elektřiny na DT SS-FCP2.....	99
Graf 45 - Citlivostní analýza provozních stavů BESS (poklesů FCR a hodin participace na FCP)....	100
Graf 46 - Citlivostní analýza variantních vývoje výší plateb za FCR.....	101

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Podíl typů zdrojů v energetickém mixu ČR a jejich emisní faktor CO ₂	7
Tabulka 2 - Hodnoty emisních faktorů vybraných zemí EU [9]	7
Tabulka 3 - Spotřeby vybraných xEV v modelu vozového parku.....	8
Tabulka 4 - Míra rozvoje elektromobility dle ukazatele osob/xEV	11
Tabulka 5 - Kapacita baterií současných modelů xEV v roce 2017	20
Tabulka 6 - Srovnání parametrů typů baterií.....	25
Tabulka 7 - Srovnání technologií dle ceny/kWh/cyklus.....	27
Tabulka 8 - Přehled spotřeby energie a emisí skleníkových plynů z výroby baterií dle typu	31
Tabulka 9 - Oblasti aplikací BESS vyřazených baterií	40
Tabulka 10 - Technické parametry BESS Vattenfall UK.....	53
Tabulka 11 - Technické parametry BESS Amsterdam Energy Arema	54
Tabulka 12 - Platby za rezervované kapacity na napěťových hladinách VN a VVN v ČR	69
Tabulka 13 - Zhodnocení možností využití BESS	70
Tabulka 14 - Základní analýza historických dat průběhu f v ES.....	73
Tabulka 15 - Porovnání dnů maxim odchylek frekvence v roce 2018	75
Tabulka 16 - Požadavky poskytování PCR v Německu [52]	76
Tabulka 17 - Analyzovaná historická data při úvaze aktivace pásma necitlivosti	80
Tabulka 18 - Výsledky simulací ročního provozu BESS s FCR=5 MW.....	84
Tabulka 19 - Porovnání investičních nákladů projektů	88
Tabulka 20 - Technické parametry navrženého kontejnerového BESS	89
Tabulka 21 - Stanovení výše prvotní investice BESS	91
Tabulka 22 - Scénáře vývoje ceny FCR	93
Tabulka 23 - Výsledky ekonomického hodnocení investice v rámci optimistického scénáře	94
Tabulka 24 - Výsledky ekonomického hodnocení investice v rámci středního scénáře	95
Tabulka 25 - Výsledky ekonomického hodnocení investice v rámci pesimistického scénáře	95
Tabulka 26 - Komplexní zhodnocení výsledku ekonomiky provozu BESS	96

Tabulka 27 - Hodnoty vstupních veličin modelu scénáře SS-FCP2	97
Tabulka 28 - Mezní kombinace hodnot meziročních poklesů parametrů	101
Tabulka 29 - Mezní kombinace hodnot parametrů výše platby za FCR	102

Seznam použitých rovnic a vzorců

- (1) Stanovení výše sankcí při překročení emisních limitů celkového vozového parku
- (2) Stanovení optimálního složení vozového parku
- (3) Aplikace rovnice pro optimální složení vozového parku
- (4) Výpočet výsledné emisní stopy výroby elektrické energie v ČR dle en. mixu
- (5) Korekce reálné spotřeby elektrické energie elektrovozidla
- (6) Výsledná emisní stopa dle země a en. mixu a vozového parku
- (7) Stanovení výše specifické energie bateriového článku
- (8) Stanovení hodnoty specifického výkonu bateriového článku
- (9) Zjednodušený výpočet SoH bateriového článku
- (10) Rovnice principu aktivace výkonu v rámci služby FCP
- (11) Dimenzování BESS pro potřeby pokrývání výkonových špiček
- (12) Dimenzování velikosti kompenzační baterie pro regulaci jalového výkonu
- (13) Výpočet koeficientu technického stavu vyřazeného bateriového článku
- (14) Rovnice pro stanovení ceny vyřazené baterie
- (15) Stanovení doby životnosti bateriového úložiště metodou EFC

Hlavní příloha

Sestavený kód programu v prostředí MATLAB reprezentující funkci matematického modelu BESS při poskytování služby FCP dle principu, který je znázorněn na Obrázek 14 - Vývojový diagram modelu provozu BESS při FCP.

```
%Načtení historických dat frekvence v ES
f_input_2013 = xlsread ('2013');
f_input_2014 = xlsread ('2014');
f_input_2015 = xlsread ('2015');
f_input_2016 = xlsread ('2016');
f_input_2017 = xlsread ('2017');
%f_input_2018 = xlsread ('2018');
%f_max = xlsread ('day_max_2018');
%f_kor=xlsread ('KOR');
%Model ročního provozu BESS pro FCP
f_input=f_input_2017; % volba historických dat pro model
%f_input=f_kor;
%f_input=f_max;
f_deviance = (f_input-50)*1000;
f_DB=f_deviance;
time=length(f_input); % počet minut v roce
SoC=zeros(time,1);
P_DB=zeros(time,1);
P_DF=zeros(time,1);
P_kor=zeros(time,1);
E_bat=zeros(time,1);
E_fcp=zeros(time,1);
E_kor=zeros(time,1);
P=zeros(time,1);
Pcelk=zeros(time,1);
SoC(1)=SoC_start;
n_kor=0;
n = 0;
while (n < time)
    n = n + 1;
    if (SoC(n)< 0.9*Cin) && (SoC(n)>0.1*Cin)
        if (f_deviance(n)<= fmax) && (f_deviance(n)>=fmin)
            if SoC(n)<= 0.4*Cin && (f_deviance(n)>=0)
                P_DB(n) = -0.1*Pmax*((0.3*Cin)/SoC(n));
            elseif SoC(n)>=0.6*Cin && (f_deviance(n)<=0)
                P_DB(n) = 0.1*Pmax*(SoC(n)/(0.6*Cin));
            else
                P_DB(n)=0;
            end
            Pcelk(n)=P_DB(n);
        else
            if f_DB(n) > 0
                P(n) = (Pmax/200) * f_DB(n)*(-1);
                if SoC(n)<=0.4*Cin
                    P_DF(n)=(P(n)*1.2)-P(n);
                else
                    P_DF(n)=0;
                end
                Pcelk(n)=P(n)+P_DF(n);
            elseif f_DB(n) < 0
                P(n) = (Pmax/200) * f_DB(n)*-1;
                if SoC(n)>=0.6*Cin
```

```

        P_DF(n)=(P(n)*1.2)-P(n);
    else
        P_DF(n)=0;
    end
    Pcelk(n)=P(n)+P_DF(n);
else
    P(n) = 0;
    Pcelk(n)=0;
end
end
E_fcp(n) = ((P(n)*-1)/60);
E_bat(n) = ((Pcelk(n)*-1)/60);
SoC(n+1) = SoC(n)+E_bat(n);
else
    if SoC(n)>= 0.9*Cin
        while (SoC(n)>= 0.6*Cin)
            P_kor(n)=(0.3*Cin)/(t_off/60);
            Pcelk(n)=P_kor(n);
            E_kor(n) = ((P_kor(n)*-1)/60);
            E_bat(n) = ((P_kor(n)*-1)/60);
            SoC(n+1) = SoC(n)+E_bat(n);
            n=n+1;
        end
        n=n-1;
        n_kor=n_kor+1;
    elseif SoC(n)<= 0.1*Cin
        while (SoC(n)<= 0.4*Cin)
            P_kor(n)=(0.3*Cin)/(t_off/60)*-1;
            Pcelk(n)=P_kor(n);
            E_kor(n) = ((P_kor(n)*-1)/60);
            E_bat(n) = ((P_kor(n)*-1)/60);
            SoC(n+1) = SoC(n)+E_bat(n);
            n=n+1;
        end
        n=n-1;
        n_kor=n_kor+1;
    end
end
end
SoC_proc=((SoC)/Cin)*100;
%Aplikace účinnosti systémy
nbat=1/n_system;
%Analýza výsledků ročního provozu BESS pro FCP
%Průměrný SoC během roku
SoC_avg = mean (SoC_proc);
figure
histogram (SoC_proc,20);
%Dodaná energie do sítě v rámci FCP
E_posfcp=sum(E_fcp(E_fcp>0));
E_negfcp=sum(E_fcp(E_fcp<0));
E_fcp=E_posfcp+(E_negfcp*-1);
%Celková energie do sítě v rámci FCP s využitím stupňů volnosti
E_pos=sum(E_bat(E_bat>0));
E_neg=sum(E_bat(E_bat<0));
E=E_pos+(E_neg*-1);
%Energie využita pro balancování SoC
E_pos_soc=E_pos-E_posfcp;
E_neg_soc=E_neg-E_negfcp;
Esoc=E_pos_soc+(E_neg_soc*-1);
%Celkové ztráty energie během provozu BESS během roku
Ez_pos=(E_pos*nbat)-E_pos;

```

```

Ez_neg=(E_neg*nbat*-1)+E_neg;
%Energie využitá pro balancování SoC
E_soc=E-E_fcp;
%Celková nakoupená korektivní energie po dosažení lim. hodnot SoC
E_poskor=sum(E_kor(E_kor>0))*nbat;
E_negkor=sum(E_kor(E_kor<0))*nbat;
%Počet stavů dosažení limitních hodnot SoC
n_k=((abs(E_negkor)+E_poskor))/n_kor;
n_korneg=E_negkor/n_k*-1;
n_korpos=E_poskor/n_k;
%Výkon během FCP
figure
histogram(P,50);
%Celkové rozložení výkonu během roku
figure
histogram(Pcelk,40);
%Výpočet jednoho EFC a 80% DoD
EFC=Cin;
DoD=0.8*EFC;
EFC_year_fcp=E/EFC;
EFC_year=E_fcp/EFC;
DoD_year=E/DoD;
figure
plot(f_deviance,Pcelk,'g*');
xlim([-200 200]);
ylim([-Pmax Pmax]);
xlabel('odchylka f [mHz]');
ylabel('Celkový výkon BESS [MW]');
figure
plot(Pcelk)
xlim([0 time]);
xlabel('čas [min]');
ylabel('Výkon BESS [MWh]');
figure
plot(P_kor)
xlim([0 time]);
xlabel('čas [min]');
ylabel('Korekční výkon [MWh]');
% SoC v procentech
figure
plot(SoC_proc)
xlim([0 time]);
xlabel('čas [min]');
ylabel('SoC BESS [%]');

```

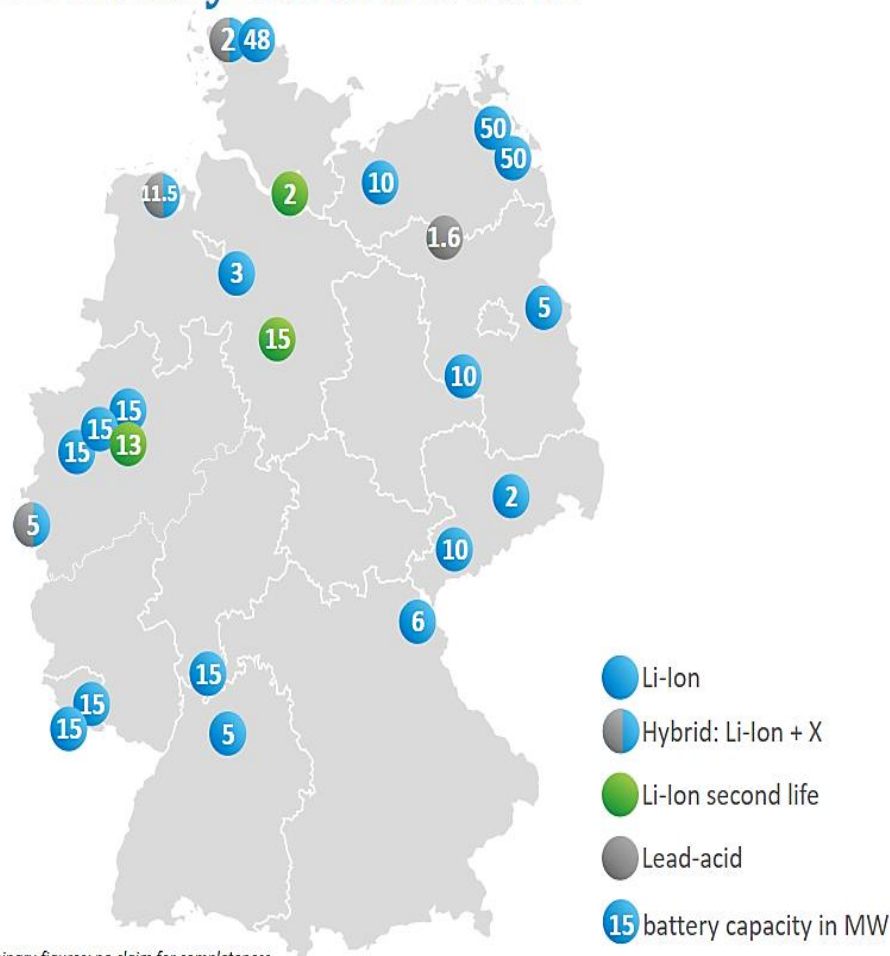
Seznam ostatních příloh

Příloha č.1 - Souhrnná výkonová záloha poskytnutá BESS pro poskytování FCP v Německu

Příloha č.2 - Historický vývoj výše plateb za rezervovaný výkon služby FCP v rámci FCR Cooperation

Batteries for Primary Control Power

Total capacity*
341 MW



*partially under construction/planned; preliminary figures; no claim for completeness
 Note: Map shows large scale battery projects above capacity of 1 MW, without pilot projects
 Source: IEK-STE Database, Energiespeicher Jülich, Büro F, Cleantechica, GTAI Research
 © Germany Trade & Invest

