

Diplomová práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3 Fakulta elektrotechnická

NÁVRH BATERIOVÉHO ULOŽIŠTĚ V ELEKTRÁRNĚ ŠTĚCHOVICE

Bc. Anna Houfková

Vedoucí práce: Mgr. Ing. Vít Klein, Ph.D.

2024

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Houfková** Jméno: **Anna** Osobní číslo: **483592**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektroenergetiky**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Specializace: **Elektroenergetika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Akumulace energie elektrárny Štěchovice pomocí bateriového uložení.

Název diplomové práce anglicky:

Energy storage of the Štěchovice power plant using a battery storage system.

Pokyny pro vypracování:

- 1) Naleznete nejvhodnější místo pro připojení bateriového uložení a na základě jeho stávajících parametrů vypočítejte maximální možný proud dodávaný z nebo do baterie.
- 2) Specifikujte potřebné úpravy přípojného místa a dalších cest pro vyvedení výkonu do distribuční soustavy/vlastní spotřeby/přílehlé budovy a úpravy zakreslete do jednopólového schématu elektrárny.
- 3) Navrhněte optimální kapacitu bateriového systému, případně naleznete jiné alternativy akumulace, které by byly pro elektrárnu vyhovující.
- 4) Nasimulujte model nabíjení a vybíjení bateriového systému.
- 5) Proveďte posouzení možností umístění bateriového systému a vedení přípojních silových kabelových tras v elektrárně.
- 6) Budoucnost akumulace energie z pohledu podpůrných služeb, smart grids a poruchy typu blackout.

Seznam doporučené literatury:

- 1) BENDA, V. a kol. Obnovitelné zdroje energie. 1. vydání Praha: Profi press, 2012, 208 s. ISBN 978-808-6726-489.
- 2) HEŘMAN, Josef a kolektiv. Příručka silnoproudé elektrotechniky. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1984. DT 621.3.027.3 (075).
- 3) MASTNÝ, Petr, Jiří DRÁPELA, Stanislav MIŠÁK, Jan MACHÁČEK, Michal PTÁČEK, Lukáš RADIL, Tomáš BARTOŠÍK a Tomáš PAVELKA. Obnovitelné zdroje elektrické energie. Praha: České vysoké učení technické v Praze. ISBN 978-80-01-04937-2.
- 4) PAŽOUT, František. Malé vodní elektrárny 1: Ekonomika, předpisy. 2. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, n. p. ISBN 80-03-00192-7.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Mgr. Vít Klein, Ph.D. katedra elektroenergetiky FEL

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

Datum zadání diplomové práce: **28.06.2023**

Termín odevzdání diplomové práce: **09.01.2024**

Platnost zadání diplomové práce: **16.02.2025**

Ing. Mgr. Vít Klein, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Zdeněk Müller, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomantka bere na vědomí, že je povinna 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 studentky

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracovala samostatně, a že jsem uvedla veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne

Bc. Anna Houfková

Poděkování

Tímto bych chtěla poděkovat svému vedoucímu Mgr. Ing. Vítu Kleinovi, Ph.D., za vedení mé diplomové práce, cenné rady a pomoc s vypracováním.

Dále bych ráda poděkovala panu Ing. Romanu Pospíšilovi, zadavateli diplomové práce a vedoucímu provozu VE Štěchovice za vstřícný přístup a poskytnutí potřebných podkladů pro vypracování této práce.

V neposlední řadě bych ráda poděkovala své rodině, přátelům a kolegům z práce za trpělivost, podporu a ochotu nejen při zpracování této diplomové práce, ale i v průběhu celého studia.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá návrhem a optimalizací bateriového uložení energie jako doplňkového systému pro vodní elektrárnu Štěchovice. Cílem práce je zkoumat možnosti využití bateriového uložení k optimalizaci výroby elektřiny a zlepšení efektivity využití obnovitelných zdrojů energie. Součástí textu je posouzení stávajícího stavu elektrárny, možnosti připojení uložení do jednopólového schématu včetně vyvedení výkonu a kabelových tras, výběru a simulace konkrétního uložení a ekonomické zhodnocení celé instalace.

Klíčová slova

Bateriové uložení, vodní elektrárna, optimalizace energetické výroby, obnovitelné zdroje energie, Štěchovice, simulace chování systému, podpůrné služby přenosové soustavy, budoucnost akumulace.

Abstract

This thesis deals with the design and optimization of a battery energy storage as a supplementary system for the Štěchovice hydroelectric power plant. The aim of the thesis is to investigate the possibilities of using the battery storage to optimize electricity production and improve the efficiency of renewable energy sources. The text includes an assessment of the current state of the power plant, the possibility of connecting the storage to a single-pole scheme including power output and cable routing, selection and simulation of a specific storage system and a economic evaluation of the whole installation.

Keywords

Battery storage, hydroelectric power plant, optimization of energy production, renewable energy, Štěchovice, simulation of system behaviour, transmission support services, future of storage.

Seznam zkratek

Zkratka	Jednotka	Popis
AC	-	střídavé
aFRR	-	automatic Frequency Restoration Reserve
AI	-	umělá inteligence
BMS	-	Battery Management System
BO	-	blackout
C	F	kapacita kapacitoru
CAES	-	Compressed Air Energy Storage
C _{bat}	Ah	kapacita baterie
CF	Kč	Cash Flow
C _{G1}	kWh	kapacita baterie nabíjená z generátoru G1
C _{G2}	kWh	kapacita baterie nabíjená z generátoru G2
c _p	J*(kg*K) ⁻¹	měrná tepelná kapacita
c _{pk}	J*(kg*K) ⁻¹	měrná tepelná kapacita kapalného skupenství
c _{pp}	J*(kg*K) ⁻¹	měrná tepelná kapacita pevného skupenství
C _{tot}	kWh	celková kapacita
C _{využ}	kWh	využitelná kapacita
DC	-	stejnoseměrné
DOH	%	Deep of Discharge
DT	-	denní trh
E _{pm}	J*kg ⁻¹	měrná energie
ERÚ	-	Energetický regulační úřad
ES	-	elektrizační soustava
EU	-	Evropská unie
f ₁	-	faktor závislý na počtu cyklů
f ₂	K	faktor závislý na teplotě při provozu baterie
FCR	-	Frequency Control Reserve
FES	-	Flywheel Energy Storage
f _n	Hz	jmenovitá frekvence
FV	-	fotovoltaické
g	m*s ⁻²	tíhové zrychlení
G1, G2	-	generátor 1, 2
H	m	spád
I	A	proud protékající cívkou
I _l	A	proud přenášený kabelem
ICT	-	informační a komunikační technologie

Zkratka	Jednotka	Popis
$I_{G10,5}$	A	proud na sekundáru blokového transformátoru
I_{G110}	A	proud na primáru blokového transformátoru
I_K	A	zkratový proud
I_{ke}	A	oteplovací zkratový proud
I_{km}	A	nárazový zkratový proud
IoT	-	Internet of Things
K	-	materiálová konstanta
L	H	indukčnost cívky
l	m	délka kabelu
l_t	$J \cdot kg^{-1}$	měrné skupenské teplo
m	kg	hmotnost media
mFRR	-	manual Frequency Restoration Reserve
mFRR ₅	-	manual Frequency Restoration Reserve in 5 minutes
MVE	-	malé vodní elektrárny
N_c	-	celkový počet zákazníků na hladině
n_j	-	celkový počet zákazníků postižených přerušením
NN	-	hladina nízkého napětí
NPV	Kč	Net Present Value
OP	-	ostrovní provoz
OZE	-	obnovitelné zdroje energie
P2G	-	power to gas
PHS	-	Pumped Hydro Storage
P_n	MW	jmenovitý výkon bloku
PpS	-	podpůrné služby přenosové soustavy
PR	-	primární regulace frekvence
p_{T1}	-	převod blokového transformátoru T1
PVE	-	přečerpávací vodní elektrárna
Q	$m^3 \cdot s^{-1}$	průtok
Q_{100}	$m^3 \cdot s^{-1}$	N – letý průtok
Q_a	$m^3 \cdot s^{-1}$	průměrný roční dlouhodobý průtok
Q_t	J	uskladněné teplo
R	Ω	odpor kabelu
r	%	výše diskontu
RZMZt	-	minutová regulace
samvyb	$\% \cdot den^{-1}$	Samovybíjení baterie
S_c	MVA	vztažný výkon

Zkratka	Jednotka	Popis
SCES	-	Superconducting Capacitor Storage
SI	-	chytré střídače
S_k	MVA	zkratový výkon
S_{KS110}	-	zkratový výkon soustavy 110 kV
SMES	-	Superconducting Magnetic Energy Storage
S_{min}	mm^2	minimální průřez kabelu
S_n	mm^2	jmenovitý průřez
S_{nG}	MVA	jmenovitý zdánlivý výkon generátoru
SOH	%	State of Health
SR	-	sekundární regulace výkonu
SRUQ	-	sekundární regulace U/Q
SV30	-	snížení výkonu
SVR	-	služby výkonové regulace
t	-	rok v pořadí
T1, T2	-	blokový transformátor
t_1, t_2	K	počáteční a koncová teplota
t_{den}	hod	doba chodu generátoru za den
t_j	S	střední doba přerušení skupiny postižených zákazníků
t_t	$^{\circ}C$	teplota tání
U	V	napětí na svorkách kapacitoru
U_c	V	vztažné napětí
U_n	V	jmenovité napětí
Unab/vyb	V	žadované nabíjecí/vybíjecí napětí dle datasheetu
U_s	V	sdužené napětí
$V(v_{soc})$	V	napětí, které modeluje stav nabití
VN	-	hladina vysokého napětí
V_{oc}	V	napětí naprázdno (v simulaci)
VŘ	-	výběrové řízení
VS_{G1}	MWh	vlastní spotřeba generátoru G1
VS_{G2}	MWh	vlastní spotřeba generátoru G2
$VS_{m\acute{e}r}$	kWh	měrná vlastní spotřeba
VVN	-	hladina velmi vysokého napětí
X_c	-	poměrná reaktance

Zkratka	Jednotka	Popis
XS ₁₁₀	-	poměrná reaktance soustavy 110 kV
X _t	-	poměrná reaktance transformátoru
δ	%	statika primární regulace
Δf	Hz	odchylka frekvence od jmenovité
ΔP	MW	požadovaná změna výkonu bloku
η _{bat}	%	účinnost baterie
ρ	kg*m ⁻³	hustota

Seznam obrázků

OBR. 1 - SCHÉMA PŘEČERPÁVACÍ ELEKTRÁRNY [28]	3
OBR. 2 - PŘEHLED PARAMETRŮ PVE V ČR [54]	4
OBR. 3- ŘEZ STROJOVNOU PRŮTOČNÉ VE [36]	5
OBR. 4 - ROZVRŽENÍ VÝROBY ELEKTŘINY V ČR (ERÚ 2021) [16]	6
OBR. 5 - DĚLENÍ AKUMULAČNÍCH SYSTÉMŮ [30]	7
OBR. 6 - PRINCIP CAES [12].....	8
OBR. 7 - SCHÉMA OLOVĚNÉHO ČLÁNKU [30]	9
OBR. 8 - SCHÉMA PALIVOVÉHO ČLÁNKU [35].....	12
OBR. 9 - ZÁVISLOST TEPLoty NA ULOŽENÉM TEPLE [44].....	13
OBR. 10 – ZÁVISLOST TEPLoty NA ULOŽENÉM TEPLE [44]	14
OBR. 11 - VNITŘNÍ USPOŘÁDÁNÍ SUPERKAPACITORU [4]	14
OBR. 12 - SCHÉMA AKUMULACE ENERGIE V MAGNETICKÉM POLI CÍVKY [45]	15
OBR. 13 - JEDNOTLIVÉ TYPY APLIKACÍ S POŽADOVANÝMI PARAMETRY ULOŽIŠTĚ [30]	16
OBR. 14- SOUČASNÝ STAV ENERGETICKÉHO MIXU ČR [29].....	18
OBR. 15- SCÉNÁŘ ENERGETICKÉHO MIXU ČR PRO ROK 2030 [29].....	18
OBR. 16- ROZLOŽENÍ VÝROBY V ČASE - SCÉNÁŘ PRO ROK 2030 [29]	19
OBR. 17- SCHÉMATICKÝ PŘEHLED VYUŽITÍ BATERIOVÉHO SYSTÉMU [19]	20
OBR. 18- REAKCE NA POKYN DISPEČINKU STANDARDNÍ ELEKTRÁRNY S TURBÍNOU A GENERÁTOREM [64]	21
OBR. 19- REAKCE BATERIE NA POKYN DISPEČINKU [64]	22
OBR. 20- SCHÉMA (PRINCIP) FUNGOVÁNÍ CHYTRÉ SÍTĚ [15]	26
OBR. 21- ARCHITEKTURA MIKROSÍTĚ [21]	27
OBR. 22- SROVNÁNÍ STRUKTURY KONVENČNÍCH ELEKTRÁREN, MIKROSÍTĚ A VPP [21]	28
OBR. 23- CHARAKTERISTIKY ÚLOŽIŠŤ ENERGIE [21].....	29
OBR. 24- PŘEDPOKLÁDANÁ INFRASTRUKTURA BUDOUCÍ VPP	30
OBR. 25 - MOŽNÉ VYUŽITÍ BATERIE "DRUHÉ ŠANCE" (TOYOTA) [14].....	31
OBR. 26- OBECNÝ PŘEHLED BATERIÍ, KTERÉ JSOU DOSTUPNÉ V EU [58].....	33
OBR. 27- TYPY ULOŽIŠŤ ELEKTŘINY V EVROPĚ [61]	35
OBR. 28- KAPACITA ULOŽIŠŤ ELEKTŘINY V EVROPĚ [61]	36
OBR. 29- PRŮTOČNÁ VODNÍ ELEKTRÁRNA S AKUMULACÍ [57]	37
OBR. 30- LOKALITA [55]	38
OBR. 31 – LETECKÝ POHLED NA ELEKTRÁRNU ŠTĚCHOVICE II [55].....	40
OBR. 32 – ŠTĚCHOVICKÁ PŘEHRADA [55]	40
OBR. 33- GRAF ČASOVÉHO PRŮBĚHU POSKYTOVÁNÍ SVR [25]	44
OBR. 34- POROVNÁNÍ MĚSÍČNÍ VÝROBY V ROCE 2018 A 2022 [37]	45
OBR. 35- PRŮBĚH VÝKONU V JEDNOTLIVÝCH MĚSÍČÍCH 2022	46
OBR. 36- VYBÍJECÍ CHARAKTERISTIKA PROUDEM 3C [24]	48
OBR. 37- NABÍJECÍ CHARAKTERISTIKA PROUDEM 1C [24]	48
OBR. 38- POPIS RŮZNÝCH TYPŮ CYKLŮ [22]	49
OBR. 39- NÁHRADNÍ SCHÉMA ELEKROCHEMICKÉHO ČLÁNKU [22].....	49
OBR. 40- JEDNOPÓLOVÉ SCHÉMA ZAPOJENÍ DO VS.....	53
OBR. 41- JEDNOPÓLOVÉ SCHÉMA PŘIPOJENÍ BATERIÍ DO ROZVODNY 10,5 kV	54
OBR. 42- ZJEDNODUŠENÉ SCHÉMA PRO VÝPOČET ZKRATOVÝCH POMĚRŮ.....	55
OBR. 43- TEORETICKÉ SCHÉMA ZAPOJENÍ BATERIE K VÝPOČTU ZKRATOVÝCH POMĚRŮ	56
OBR. 44- MOŽNÉ SCHÉMA ZAPOJENÍ BATERIE DO ROZVODNY 22 kV	59
OBR. 45- ZJEDNODUŠENÉ SCHÉMA ŘEZU BATERIOVÉHO ÚLOŽIŠTĚ [25].....	60
OBR. 46- SCHÉMA PRVKŮ UVNITŘ KONTEJNERU [46]	61
OBR. 47- SCHÉMATICKÉ ZAPOJENÍ PRVKŮ BATERIE MEGATRON 1,2 MW [46].....	61
OBR. 48- REÁLNÉ PROVEDENÍ ULOŽIŠTĚ [46]	62
OBR. 49- FOTOGRAFIE STÁVAJÍCÍ ROZVODNY R1 + R2 + R10	62
OBR. 50- SCHÉMA PRO VÝPOČET PROUDŮ	63
OBR. 53- NÁHRADNÍ OBVOD PRO SIMULACI	65
OBR. 54- SCHÉMA MODELU V LTSPICE.....	67
OBR. 55- SIMULACE VYBÍJENÍ BATERIE.....	68
OBR. 56- PŘIBLIŽENÍ SIMULACE VYBÍJENÍ.....	69

OBR. 57- SIMULACE NABÍJENÍ BATERIE	69
OBR. 58- PŘIBLÍŽENÍ SIMULACE NABÍJENÍ	70
OBR. 59- REÁLNÉ UMÍSTĚNÍ BATERIÍ V AREÁLU ELEKTRÁRNY	71
OBR. 60- PREDIKCE VÝVOJE POTŘEBY SLUŽBY FCR	73
OBR. 61- GRAFICKÉ POSOUZENÍ NPV VARIANT	77
OBR. 62- CITLIVOSTNÍ ANALÝZA - ZÁVISLOST NPV NA ZMĚNĚ ESKALACE CEN ZA SVR	77
OBR. 63- CITLIVOSTNÍ ANALÝZA - ZÁVISLOST NPV NA ZMĚNĚ DISKONTU (NĚKTERÉ PRŮBĚHY SE PŘEKRÝVAJÍ)	78
OBR. 64- CITLIVOSTNÍ ANALÝZA - ZÁVISLOST NPV NA ZMĚNĚ ESKALACE CEN ZA ELEKTRINU (NĚKTERÉ PRŮBĚHY SE PŘEKRÝVAJÍ)	79

Seznam tabulek

TABULKA 1- ZÁKLADNÍ TECHNICKÉ PARAMETRY PVE [60]	5
TABULKA 2- PŘEHLED ZÁKLADNÍCH PARAMETRŮ BATERIOVÝCH TECHNOLOGIÍ [19]	11
TABULKA 3- SROVNÁNÍ AKUMULAČNÍCH SYSTÉMŮ [30]	16
TABULKA 4- CENY ZA POSKYTOVÁNÍ REGULAČNÍ ZÁLOHY [19]	24
TABULKA 5- SEZNAM NEJVÝZNAMNĚJŠÍCH PROJEKTŮ VPP [21]	30
TABULKA 6- SOUHRN MATERIÁLŮ OBSAŽENÝCH V LI-ION BATERIÍCH U PROTOTYPNÍCH BATERIÍ (HYBRIDNÍ VOZY) [58]	33
TABULKA 7- PARAMETRY VD ŠTĚCHOVICE.....	39
TABULKA 8- SHRNUÍ DAT Z DENNÍCH DIAGRAMŮ VÝROBY	46
TABULKA 9- SHRNUÍ DAT DIAGRAMŮ VÝROBY – REALITA DODÁNÍ DO SÍTĚ.....	46
TABULKA 10- SOUHRN TECHNICKÝCH VSTUPŮ PRO NÁVRH BATERIE	51
TABULKA 11- CELKOVÉ SPECIFIKACE ZVOLENÉHO ULOŽIŠTĚ [46]	62
TABULKA 12- PRŮMĚRNÉ CENY ZA POSKYTOVÁNÍ SVR PRO ROK 2022	74
TABULKA 13- MEZIROČNÍ BILANCE INFLACE OD ROKU 2011 DO ROKU 2023	74
TABULKA 14- MEZIROČNÍ BILANCE CEN ELEKTRINY OD ROKU 2012 DO ROKU 2024	74
TABULKA 15- PŘEHLED CEN CELKEM (PRO 1 KONTEJNER)	75
TABULKA 16- POSOUZENÍ VARIANT DLE NPV.....	76
TABULKA 17- ZMĚNA CEN ZA POSKYTOVÁNÍ SVR PO ESKALACI 90 % PO 1. ROCE	78

Seznam příloh

PŘÍLOHA 1- PŘEHLED DENNÍ VÝROBY PO MĚSÍCÍCH ZA ROK 2022/2023
PŘÍLOHA 2 – JEDNOPÓLOVÉ SCHÉMA ELEKTRÁRNY
PŘÍLOHA 3 – VÝŇATKY Z DATASHEETU BESS MEGATRON 1 MW
PŘÍLOHA 4 – ZAKRESLENÍ KABELOVÉ TRASY DO PŮDORYSU ELEKTRÁRNY (1. A 0. PODLAŽÍ)
PŘÍLOHA 5 – CENOVÁ NABÍDKA ROZVADĚČE (ABB)
PŘÍLOHA 6 – EKONOMICKÉ VÝPOČTY (EXCEL)

Obsah

1	ÚVOD	1
2	TEORETICKÝ ÚVOD	2
2.1	VODNÍ ELEKTRÁRNY	2
2.1.1	<i>Přečerpávací vodní elektrárny</i>	3
2.1.2	<i>Průtočné vodní elektrárny</i>	5
2.2	AKUMULACE ELEKTRICKÉ ENERGIE	6
2.2.1	<i>Rozdělení akumulčních systémů</i>	6
2.2.2	<i>Mechanické akumulční systémy</i>	7
2.2.3	<i>Elektrochemické akumulční systémy</i>	8
2.2.4	<i>Chemické akumulátorové systémy</i>	11
2.2.5	<i>Tepelné akumulátorové systémy</i>	12
2.2.6	<i>Elektrické akumulční systémy</i>	14
2.2.7	<i>Porovnání akumulčních systémů</i>	16
2.3	VYUŽITÍ BATERIOVÝCH SYSTÉMŮ.....	17
2.3.1	<i>Možné využití baterií v přenosové soustavě</i>	21
2.3.2	<i>Možné využití baterií v distribuční soustavě</i>	25
2.3.3	<i>Integrace bateriového systému se smart grids</i>	25
2.3.4	<i>Budoucí technologická podoba bateriového uložště</i>	31
2.3.5	<i>Ekologie a likvidace</i>	32
2.4	BATERIOVÉ SYSTÉMY VE SPOJENÍ S VODNÍ ELEKTRÁRNOU.....	34
2.4.1	<i>Legislativa</i>	34
2.4.2	<i>Způsoby implementace akumulace do vodní elektrárny</i>	37
2.5	VODNÍ ELEKTRÁRNA ŠTĚCHOVICE	38
3	PRAKTICKÝ NÁVRH BATERIOVÉHO SYSTÉMU VE ŠTĚCHOVICÍCH.....	41
3.1	PRŮBĚH NÁVRHU BATERIOVÉHO SYSTÉMU K VODNÍ ELEKTRÁRNĚ	41
3.2	IDENTIFIKACE POTŘEBY ULOŽIŠTĚ.....	41
3.2.1	<i>Podmínky pro poskytování SVR</i>	42
3.3	ANALÝZA DAT.....	44
3.4	VÝBĚR TECHNOLOGIE BATERIÍ	47
3.4.1	<i>Li – Ion baterie</i>	47
3.4.2	<i>Vadium – redoxové baterie</i>	47
3.4.3	<i>Zinek – bromidové baterie</i>	47
3.5	NÁVRH KAPACITY BATERIOVÉHO SYSTÉMU	49
3.5.1	<i>Cykly a životnost baterie</i>	49
3.5.2	<i>Výpočet kapacity</i>	50
3.6	NÁVRH ZAPOJENÍ	53
3.6.1	<i>Návrh přípojných míst v rozvodně 10,5 kV</i>	55
3.6.2	<i>Nutné úpravy pro možnost připojení baterie o větším výkonu</i>	58
3.7	VÝBĚR BATERIOVÉHO SYSTÉMU	59
3.7.1	<i>Schéma zapojení vybraného systému do schématu</i>	62
	64
3.7.2	<i>Simulace nabíjení/vybíjení baterie</i>	65
3.8	NÁVRH VYVEDENÍ VÝKONU Z BATERIOVÉHO SYSTÉMU.....	71
3.8.1	<i>Fyzické umístění baterie v elektrárně</i>	71
3.8.2	<i>Nalezení vhodného kabelu pro vyvedení výkonu</i>	72
4	EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ	73
4.1	CENY ZA POSKYTOVÁNÍ PODPŮRNÝCH SLUŽEB	73
4.2	DISKONT, ESKALACE	74
4.3	VÝNOSNOST INVESTICE.....	74
4.4	EKONOMICKÉ VSTUPY	75
4.5	PŘEHLED VARIANT.....	76
4.5.1	<i>Citlivostní analýzy</i>	77

5	ZÁVĚR.....	80
6	ZDROJE.....	82

1 Úvod

Vodní elektrárny představují důležitou součást energetického mixu, který je klíčový pro udržitelnou a ekologicky šetrnou výrobu elektřiny. Nicméně, tento způsob produkce elektřiny často čelí výzvám spojeným s fluktuací vodního toku, což může ovlivnit jejich schopnost konstantně generovat elektřinu. Pro řešení tohoto problému byly navrženy různé metody a technologie, mezi které patří i bateriová uložení, jinak také nazývaná akumulátorová uložení.

Bateriová uložení představují inovativní a stále se rozvíjející řešení pro uchování elektřiny z vodních elektráren v dobách nadbytku produkce, aby mohla být využita v dobách nižší výroby. Tato technologie nabízí několik výhod, včetně schopnosti stabilizovat výrobu elektřiny, vyrovnat zatížení sítě a zlepšit celkovou energetickou účinnost. Akumulace energie je využívána i v mnoha jiných podobách. Například v České republice je zastoupeno několik typů akumulčních systémů. Tento posun k efektivnímu využití vyrobené energie, včetně její akumulace, je velmi důležitý i pro docílení uhlíkové neutrality, tedy k rozsáhlému nasazení obnovitelných zdrojů energie. Samozřejmě lze předpokládat, že tento rozvoj energetiky k decentralizované výrobě z OZE (tzn. energetická tranzice) bude doprovázen i rozvojem a modernizací sítě ve smyslu chytrých měření, virtuálních elektráren, obecně smartgrids.

Rozvoj akumulace energie naráží na jednu velkou překážku, kterou je legislativa. Technologický rozvoj uložení předstihl rozvoj dané legislativy, a ta se stává největší zábranou v nasazení bateriových systémů do elektrizační soustavy České republiky.

Cílem této diplomové práce je provést komplexní analýzu bateriových uložení v kontextu vodní elektrárny Štěchovice. Práce se bude zabývat teoretickými základy bateriových technologií, principy provozu vodních elektráren a jejich specifickými výzvami a následně zkoumat možnosti a výhody implementace bateriového uložení ve vodních elektrárně Štěchovice. Veškeré ceny jsou uváděny bez DPH.

Dále se práce zaměří na technické, ekonomické a environmentální aspekty spojené s použitím bateriových uložení u vodních elektráren. Bude provedena analýza efektivity těchto systémů, jejich nákladů a potencionálního vlivu na snižování skleníkových plynů.

V závěru této práce budou prezentovány výsledky analýz a doporučení pro efektivní a udržitelné využití bateriového uložení ve vodní elektrárně Štěchovice. Tímto způsobem bude diplomová práce přispívat k hlubšímu porozumění, možnostem, výzvám a přínosů této technologie pro energetický sektor a ochranu životního prostředí.

2 Teoretický úvod

Pro lepší popsání problematiky je vhodné nejprve uvést základní teoretické předpoklady, které budou dále diskutovány v této práci.

2.1 Vodní elektrárny

Vodní elektrárny lze rozdělit do několika kategorií dle základních kritérií, které jsou: získaný spád a velikost využívaného spádu, způsob provozu, velikost měrné energie, velikost instalovaného výkonu, obchodní označení¹.

Dle získaného spádu lze elektrárny dělit na:

- přehradní – spád vytvořený přehradou,
- jezové,
- zdržové – spád je vytvořen jezem,
- derivační – využívá vedení vody mimo vodní tok pomocí derivačního přivaděče (kanál, štola, potrubí),
- přehradně derivační – kombinace zdržového a derivačního způsobu.

Dle velikosti získaného spádu lze elektrárny dělit na:

- nízkotlaké – využívají spád do 20 m (běžně elektrárny jezové),
- středotlaké – využívají spád nad 20 m do 100 m (běžně elektrárny břehové),
- vysokotlaké – využívají spádu nad 100 m (běžně elektrárny s tlakovým derivačním přivaděčem).

Dle způsobu provozu lze elektrárny dělit na:

- průtočné – nemají akumulační nádrž a výrazně neovlivňují přirozený průtok vody,
- akumulační – jedná se o řízený odběr vody z akumulační nádrže vytvářející spád (k nimž patří i elektrárny přečerpávací).

Dle velikosti měrné energie lze elektrárny dělit na:

- nízkotlaké – $E_{pm} < 200$ J/kg,
- středotlaké – $E_{pm} < 1000$ J/kg,
- vysokotlaké – $E_{pm} > 1000$ J/kg.

Dle velikosti instalovaného výkonu lze elektrárny dělit na:

- velké – s instalovaným výkonem nad 200 MW,
- střední – s instalovaným výkonem od 10 MW do 200 MW,
- malé – s instalovaným výkonem do 10 MW.

Dle obchodního označení lze elektrárny dělit na:

- domácí mikroeletřárny – s instalovaným výkonem do 35 kW,
- mikroeletřárny – s instalovaným výkonem od 35 kW do 100 kW,
- mini elektrárny – s instalovaným výkonem od 100 kW do 1 MW,
- průmyslové elektrárny – s instalovaným výkonem od 1 MW do 10 MW.

¹ [49] STUDENÍK, Jiří a Michal SVITAVSKÝ. *Energie vody, větru, biomasy* [online]. 2016. Brno: Podpora přírodovědného a technického vzdělávání na středních školách v Jihomoravském kraji [cit. 2021-03-26]. ISBN 978-80-88058-08-3. Dostupné z: <https://publi.cz/books/90/Impresum.html>

2.1.1 Přečerpávací vodní elektrárny

Jelikož se tato práce zabývá vodní elektrárnou Štěchovice, je příhodné věnovat nejvíce pozornosti problematice přečerpávacích (Štěchovice II.) a průtočných vodních elektráren (Štěchovice I.)

Přečerpávací vodní elektrárny (PVE) jsou vodní elektrárny, které dokáží akumulovat energii ve formě gravitační potenciální energie vody. Hlavní činnost PVE je regulace výkyvu aktuální spotřeby elektrické energie.

Mezi základní prvky PVE patří spodní a horní nádrž, přivaděč a elektrárna (viz Obr. 1). Základní pracovní cykly PVE jsou cyklový a turbínový, turbínový cyklus je aktuální v okamžiku nedostatku elektrické energie. V horní nádrži se otevře kulový uzávěr a voda začne proudit přivaděčem k turbíně, tím dochází k roztáčení turbíny a následně výrobě elektrické energie. Do čerpadlového cyklu je elektrárna uvedena v okamžiku přebytku elektrické energie, turbína je udržována v chodu pomocí motor-generátoru a tím tedy dochází ke spotřebě elektrické energie, neboť turbína čerpá vodu do horní nádrže².



Obr. 1 - Schéma přečerpávací elektrárny [28]

Výstavba PVE v České republice se nejvíce rozšířila v období od roku 1950 do roku 1962. Jednalo se zejména o Vltavskou kaskádu, kde k dříve vybudovaným elektrárnám Vrané a Štěchovice I. byly dobudovány velké přehradní elektrárny. Celkem tedy do roku 1961 měly elektrárny na Vltavské kaskádě výkon 750 MW. V období po roce 1970 se začala výstavba orientovat na velké přečerpávací elektrárny (Dalešice, Dlouhé Stráně). Byla opomenuta výstavba malých vodních elektráren, jako neperspektivních zdrojů pro pokrytí energetických potřeb státu³.

² [28] KRÁLOVÁ, Magda. *Činnost přečerpávací elektrárny: Věda a technika v pozadí* [online]. 2007 [cit. 2023-02-08]. Dostupné z: <http://edu.techmania.cz/cs/veda-v-pozadi/663>

³[2] BOUŠKA, Jan. *Historie energetiky*. In: *SPVEZ* [online]. 2017 [cit. 2023-02-08]. Dostupné z: <https://www.spvez.cz/cs/historie>

Avšak první PVE byla v České republice uvedena do provozu roku 1930, jednalo se o elektrárnu Černé jezero na Šumavě s výkonem 1,5 MW. Druhou PVE byla elektrárna Pastviny, která byla uvedena do provozu roku 1938. V roce 1947 následovala PVE Štěchovice II., která v 70. letech přestala stačit na vykrývání prudkých změn v soustavě a roku 1978 byla proto uvedena do provozu PVE Dalešice. Nejnovější PVE na území České republiky je elektrárna Dlouhé Stráně, která byla uvedena do provozu roku 1996.

Celkem se tedy na území ČR nachází 3 PVE, všechny jsou ve vlastnictví společnosti ČEZ, a.s.. Do budoucna je velmi náročné plánovat výstavbu nových PVE, jelikož s jejich uvedením do provozu jsou spojené vysoké náklady a citelný zásah do krajiny. Byla pouze zvažována možnost přestavby vodní elektrárny Orlík v roce 2013. Nejnovější vodní elektrárna se nachází v podzemních prostorách bývalého ostravského Dolu Jeremenko a byla uvedena do provozu v roce 2015, avšak neplní funkci klasické PVE, nýbrž slouží jako pilotní zařízení pro výzkumné účely⁴.

Elektrárna	Štěchovice II	Dalešice	Dlouhé Stráně
Uvedení do provozu	1947 1996 rekonstrukce	1978 2007 rekonstrukce	1996
Výkon [MW]	45	480 (4 · 120)	650 (2 · 325)
Počet soustrojí	1	4	2
Typ turbín	Francis reverzní FR 180	Francis reverzní	Francis reverzní FR100
Turbinový spád [m]	209,8-219,5	60,5-90,7	534,3
Průtok turbínou [m ³ /s]	24 (výroba) 21 (čerpání)	150 (výroba) 137,5 (čerpání)	68,6(výroba) 54,5(čerpání)
Průměr oběžného kola [mm]	2 200	6 000	4 540
Otáčky [ot./min]	600	136,4	428,6
Objem horní nádrže [mil. m ³]	0,467	127	2,72

Obr. 2 - Přehled parametrů PVE v ČR [54]

⁴ [54] VOBOŘIL, David. Přecherčpávací vodní elektrárny v České republice. In: *Energetice* [online]. 3.1.2017 [cit. 2023-02-08]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrina/precerpavaci-vodni-elektrarny-v-ceske-republice>

Kategorie	Hodnota
Výkon [MW]	100–2500
Čas vybíjení [hod.]	4-16
Životnost [roky]	30-60
Samovybíjení [%]	0
Měrná výroba energie [Wh*dm ⁻³]	0,2-2
Měrný výkon [W*dm ⁻³]	0,1-0,2
Účinnost [%]	70-85
Reakční čas	jednotky – desítky minut

Tabulka 1- Základní technické parametry PVE [60]

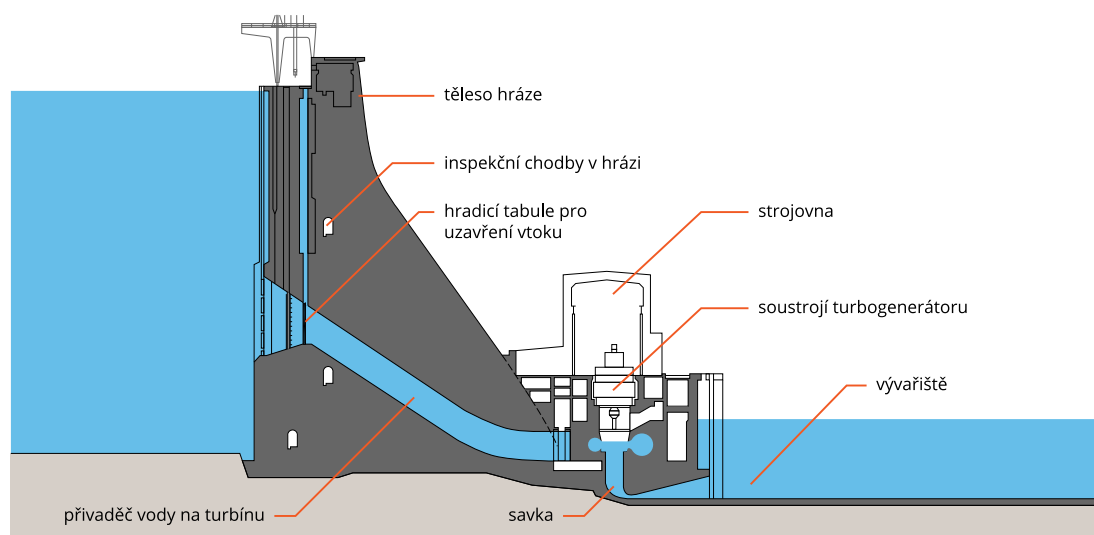
PVE plní v elektrizační soustavě funkci statickou, dynamickou a kompenzační. Statickou funkcí se rozumí schopnost vyrovnávat přebytky a nedostatky elektrické energie v síti. Dynamická funkce zahrnuje podpůrné služby, PVE funguje jako rychle startující rezerva – přečerpávací elektrárny jsou schopny najet na plný výkon během několika minut. Dále poskytuje kompenzační funkci, tedy regulaci napětí v soustavě.

Původně však měly PVE pracovat ruku v ruce s jadernými elektrárnami a vyrovnávat výkyvy v dodávaném výkonu (PVE měly akumulovat nadbytečný výkon).

2.1.2 Průtočné vodní elektrárny

Tato energetická technologie využívá kinetickou energii a potenciální energii proudící vody k produkci elektrické energie.

Průtočné vodní elektrárny využívají přirozený tok řeky nebo potoka ke generování elektřiny. Hlavním prvkem této technologie je vodní turbína, která je umístěna ve vodním toku. Při průchodu vody turbínou dochází k přeměně kinetické energie vody na mechanickou energii otáčející se turbíny. Mechanická energie je následně přeměňována na elektrickou energii generátorem připojeným k turbíně. Vyprodukovaná elektřina je přiváděna do elektrické sítě a dále distribuována do domácností a průmyslových zařízení.

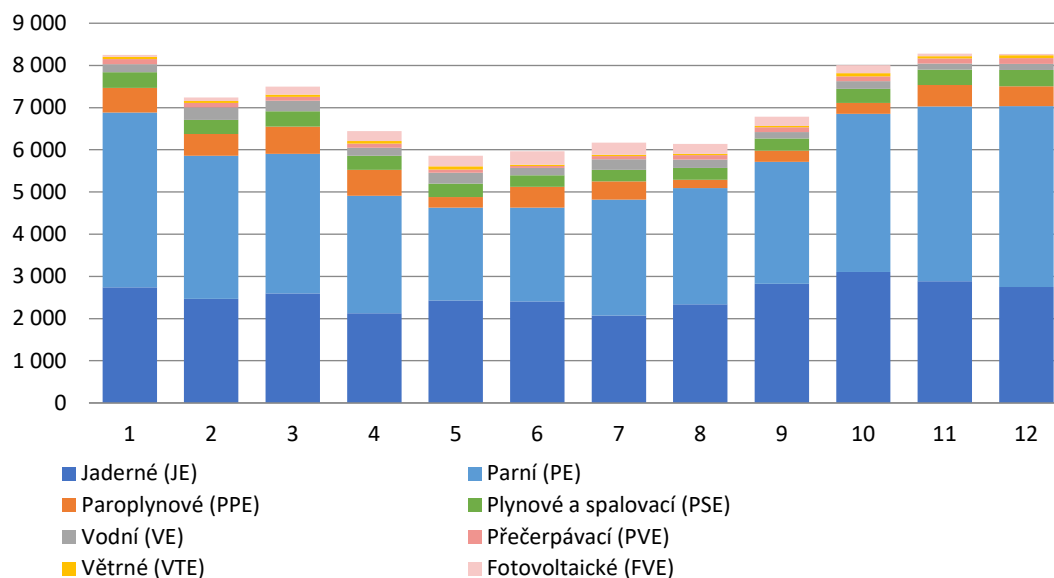


Obr. 3- Řez strojovnou průtočné VE [36]

2.2 Akumulace elektrické energie

S rostoucí poptávkou po elektrické energii roste i požadavek na růst instalovaného výkonu elektráren, aby bylo možné spotřebu pokrýt. Vzhledem k tomu, že většina instalovaného výkonu je tvořena parními a jadernými elektrárnami (viz Obr. 4), které nedokáží pohotově reagovat na změnu zátěže, je nutno využít akumulace elektrické energie z těchto zdrojů. Dnes se na plošnou dodávku špičkového výkonu využívají především přečerpávací vodní elektrárny, které mají velký regulační rozsah.

Výroba elektřiny brutto (GWh)



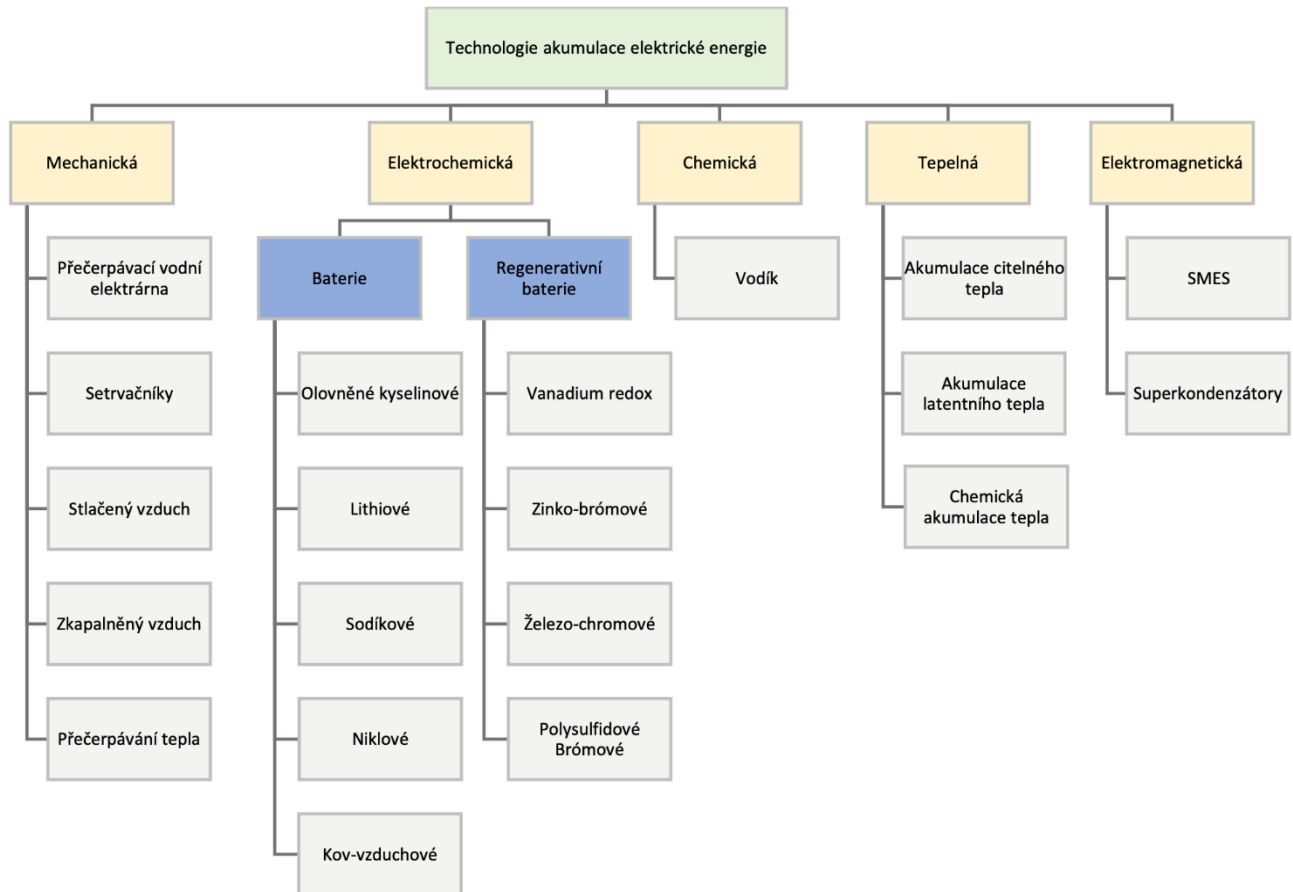
Obr. 4 - Rozvržení výroby elektřiny v ČR (ERÚ 2021)⁵ [16]

V roce 2021 bylo cca 9 % vyrobené elektřiny vyprodukováno fotovoltaickými elektrárnami a cca 2 % větrnými (viz Obr. 4). V následujících letech lze očekávat navýšení tohoto podílu vzhledem ke snaze o bezemisní energetiku. Tyto obnovitelné zdroje budou jedním z hlavních důvodů akumulace, neboť se jedná o zdroje obtížně regulovatelné a bude potřeba akumulačních systémů, které jsou schopny reagovat v jednotkách sekund pro eliminaci rychlých změn napětí.

2.2.1 Rozdělení akumulačních systémů

Akumulační systémy lze dělit dle různých parametrů, např. dle rychlosti poskytnutí výkonu, dle velikosti akumulační kapacity, dle počtu cyklů nabití nebo fáze přeměny (homogenní = ukládání a odběr energie je shodný princip přeměny energie, heterogenní = ukládání a odběr energie jsou dva odlišné typy přeměny energie).

⁵ [16] ERÚ. Roční zpráva o provozu ES ČR 2021 [online]. Praha, 2022 [cit. 2023-02-01]. Dostupné z: <https://www.eru.cz/rocní-zpráva-o-provozu-elektrizační-soustavy-cr-pro-rok-2021>



Obr. 5 - Dělení akumulčních systémů [30]

2.2.2 Mechanické akumulční systémy

PVE pracují na principu ukládání energie do potenciální energie vody (viz kapitola 2.1.1).

Výkon PVE bez ztrát lze vypočítat jako⁶:

$$P_{PVE} = \frac{E_p}{t} = \frac{m \cdot g \cdot h}{t} = Q \cdot g \cdot h \cdot \rho [W] \quad (2.1)$$

kde

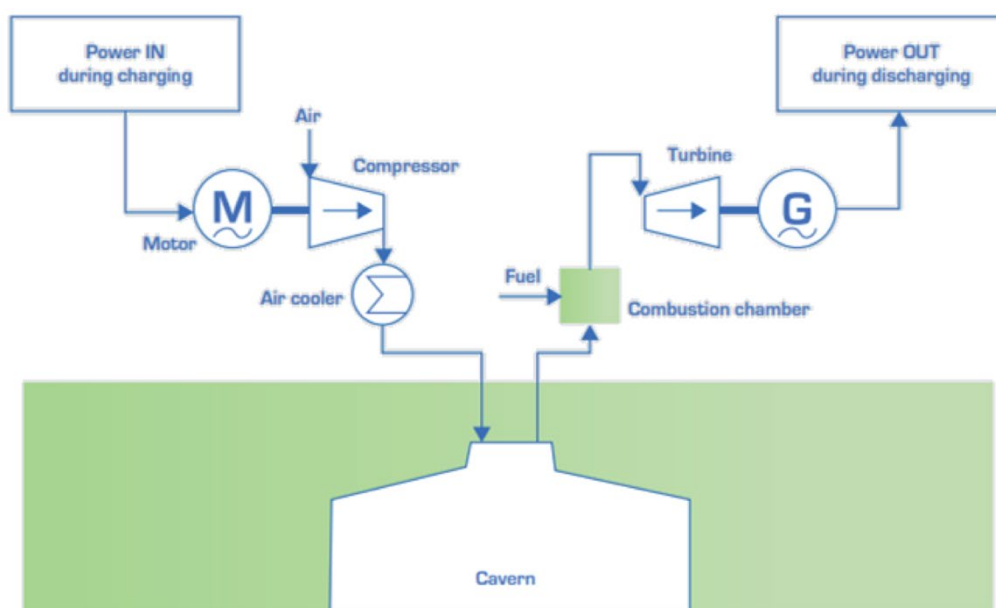
Q	... průtok turbínou [m ³ *s ⁻¹],
ρ	... hustota vody [kg*m ⁻³],
g	... tíhové zrychlení [m*s ⁻²],
h	... výškový rozdíl nádrží (spád) [m],
Ep	... potenciální energie vody [J,Ws].

Z energetického hlediska jsou PVE velmi žádané, ale potýkají se s odporem ochránců přírody z důvodu přílišného zásahu do krajiny.

⁶ [2] BUDÍN, Jan. *Přečerpávací vodní elektrárna - princip a uspořádání*. In: *oEnergetice.cz* [online]. 3.3. 2015 [cit. 2023-02-2023]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrina/precerpavaci-vodni-elektrarna-princip-usporadani-2/>

Setrvačníky fungují na principu přeměny elektrické energie na kinetickou a zpět. Výhodou je jednoduchá konstrukce, která spočívá v upevnění co nejtěžšího setrvačnicku na hřídel spojený převodovkou s elektromotorem. Při ukládání energie se napájí elektromotor a elektrická energie se mění v kinetickou energii hmoty setrvačnicku. Setrvačníky umožňují rychlou reakci na změnu frekvence elektrické sítě a dokáží ji udržovat stabilní – dokáží nahromadit velké množství energie a po krátkou dobu poskytnout velký výkon.

CAES (akumulace do stlačeného vzduchu) se principem podobá přečerpávacím elektrárnám, jen se namísto čerpání vody do vyššího místa využívá stlačování a uskladňování vzduchu do tlakových nádob. Stlačování plynu vede k uvolnění tepla, které je odváděno chladiči do okolí. Při expanzi je stlačený vzduch zahříván spalováním zemního plynu nebo methanu. Účinnost takové metody je 40 %⁷.



Obr. 6 - Princip CAES [12]

LAES (akumulace do zkapalněného vzduchu) pracuje na podobném principu jako CAES, ale obsahuje navíc jednu fázi, a to zkapalnění a uložení kapalného vzduchu.

PHES (akumulace přečerpáváním tepla) pracuje na principu tepelného čerpadla při vytápění/chlazení budovy. Tepla je podobně jako v PVE čerpáno pomocí argonu. Na začátku je argon při normálním tlaku a teplotě. Motor roztáčí kompresor a ten tlakuje argon, tím se zvýší i jeho teplota. Plyn následně pomalu prochází tepelným zásobníkem, který argonu odebere tepla. Následně je přiveden do expandéru, kde je snížen tlak na počáteční stav, tím se plyn ochladí. Průchodem druhým zásobníkem je plyn ohřát na normální teplotu. Touto metodou lze uchovat až 1 GWh.

2.2.3 Elektrochemické akumulční systémy

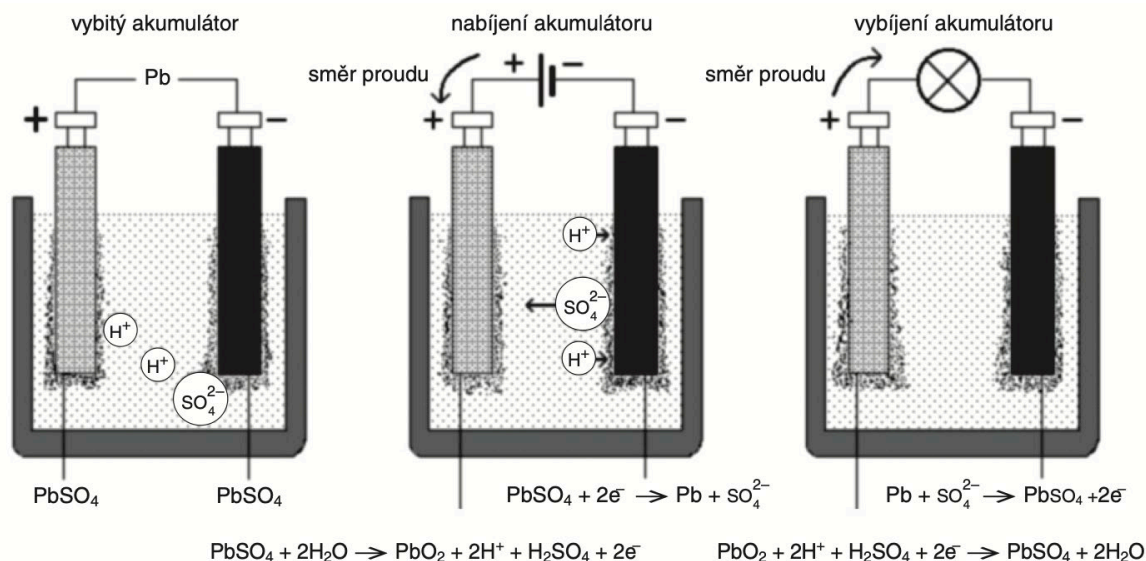
Baterie fungují na principu přeměny chemické energie na elektrickou a naopak. Každý bateriový článek obsahuje kladný a záporný pól v elektrolytu, který umožňuje přesun iontů mezi elektrodami.

⁷ [12] EASE [European Association for Storage of Energy]. *Technologies*. European Association for Storage of Energy [online]. [cit. 2023-02-08]. Dostupné z: <https://ease-storage.eu/energy-storage/technologies/>

Bateriové systémy se nesestávají ze samostatných baterií, nýbrž i z výkonové a řídicí elektroniky. Bateriové systémy jsou tedy dodávány jako komplexní jednotky.

Základním parametrem bateriového systému je výkon (tj. výstupní výkon celého systému) a kapacita. Mezi další parametry patří životnost (tj. počet cyklů). Cyklem je myšleno jedno plné nabití a vybití. Kritickými komponenty systému jsou střídače, jejichž životnost může být menší než životnost baterií. Pokud není bateriový systém využíván v plném rozsahu kapacity může dojít k tzv. „paměťovému efektu“, což je pokles využitelné kapacity baterie v důsledku nevyužívání plné kapacity. Paměťový efekt lze eliminovat tzv. formátováním baterie, tedy jejím hlubokým vybitím a následně plným nabitím. Životnost baterie se tedy prodlužuje, pokud je správně dodržována úroveň nabití – žádoucí je provozovat baterii s co možná nejvyšší stálou úrovní nabití. K životnosti baterie se váže další parametr, kterým je účinnost. Jedná se o účinnost cyklu, tedy plného nabití a vybití. Účinnost zahrnuje i ostatní komponenty systému (ztráty, účinnost střídače).

Akumulátorové baterie akumulují energii ve formě chemické energie. Jejich výhodou je dobře zvládnutá technologie výroby, operativní použití na jakémkoli místě, možnost mnohonásobného opětovného nabíjení a relativně nízká cena. Nevýhodou je samovybíjení a citlivost na hluboké vybíjení, při kterém nastávají nevratné změny na elektrodách s následkem snižování kapacity akumulátoru. Vybitý akumulátor se nabíjí tak, že reakční produkty se převedou elektrickým proudem opět na původní reaktant. Během nabíjení nabíjecím proudem z jiného zdroje se dodávaná elektrická energie mění na chemickou energii a během vybíjení se akumulovaná chemická energie opět mění na elektrickou, dodávanou do elektrického obvodu. Elektrické napětí elektrochemických článků se pohybuje podle typu akumulátorů v hodnotách 1,1–2 V. Nejběžněji je používán olověný akumulátor s olověnými elektrodami (elektrolytem je zředěná kyselina sírová, která v roztoku disociuje na kladné vodíkové ionty a záporné síranové ionty (viz Obr. 7). Olověné baterie jsou velmi spolehlivé a bezpečné, současně je jejich výhodou vysoká účinnost (až 90 %) a recyklovatelnost. Tyto baterie mají nízkou pořizovací cenu vzhledem k ostatním druhům baterií a jsou nehořlavé. Lze je použít pro regulaci frekvence sítě nebo ve spojení s fotovoltaickými elektrárnami.



Obr. 7 - Schéma olověného článku [30]

Mezi další zástupce akumulátorových baterií patří například nikl-kadmiové (NiCd) a nikl-železné (NiFe). NiFe baterie jsou složeny z železných a niklových destiček ponořených do elektrolytu hydroxidu draselného. Výhodou je, že neobsahují kadmium ani olovo, které jsou nebezpečné pro životní prostředí.

Naopak výhodou NiCd baterií je jejich spolehlivost a dlouhá životnost, ale z ekologických důvodů jsou momentálně nahrazovány NiMH články a Li-ion články. Obecný princip Li-ion baterií spočívá v transportu lithiových iontů mezi katodou a anodou při vybíjení a nabíjení. Články neobsahují kovové lithium, pouze ionty, které jsou implementovány do struktury jiných materiálů.

Baterií na trhu existuje mnoho, pro účely této práce je však třeba výčet zúžit na technologie, které jsou vhodné pro využití v přenosové/distribuční soustavě. Přehled (viz Tabulka níže)^{8 9}.

1. **Olověné baterie**, které jsou využívány v traktoru, záložních systémech elektráren, UPS jednotkách apod. V oblasti energetiky však tyto technologie nejsou hojně využívány, a to kvůli malým nabíjecím proudům a nízké životnosti (tj. nízký počet cyklů). Výhodou ovšem jsou nízké náklady této technologie.
2. **Lithiové baterie** jsou nasazovány v přenosných zařízeních (mobilní telefony, powerbanky, notebooky). Baterie na bázi lithia disponují 3–5krát více cykly než baterie olověné. Současně i nabíjecí/vybíjecí proud dosahuje vyšších hodnot, což dodává lithiovým bateriím potřebné vlastnosti pro instalaci v energetice (ve světě jsou instalovány systémy o výkonech přibližně 1–100 MW).
3. **Vanadium–redoxové baterie** jsou představitelem poměrně nové technologie – baterie se skládá ze dvou nádrží s různými elektrolyty. Čerpáním těchto elektrolytů do článku dochází k elektrochemickým procesům, kapacita těchto baterií je tedy dána velikostí nádrží pro elektrolyt a výkon je dán typem elektrochemického článku. Obrovskou výhodou tedy je, že při vybíjení/nabíjení nedochází k degradaci elektrolytu, což zvyšuje životnost baterií na 10–15krát většího počtu cyklů než lithiové baterie. Nevýhodou jsou vysoké investiční výdaje. V současné době je tato technologie využívána pro akumulaci energie z obnovitelných zdrojů.
4. **Zinek–bromidové baterie** jsou obdobou vanadium – redoxové baterie (rozdílem je pouze materiál elektrolytu, tedy bromid zinečnatý). Díky vysokým investičním nárokům není tato technologie masivně využívána.

⁸ [47] Sandia national laboratories, „DOE global energy storage database“, Database, 2016.

[Online]. Dostupné z: <http://www.energystorageexchange.org/>. [cit. 2023-10-18]

⁹ [19] HAVLÍK, Daniel. Využití bateriových systémů pro poskytování Podpůrných služeb. Online, Diplomová. Praha: ČVUT FEL. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/68479/F3-DP-2017-Havlik-Daniel-Diplomova%20prace_Daniel%20Havlik.pdf?isAllowed=y&sequence=1. [cit. 2023-10-18].

Parametry	Olověná baterie	Lithiová baterie	Vanadium-redoxová baterie	Zinek-bromidová baterie
Vybíjecí výkon	řádově 1 MW	řádově 1 MW	řádově 0,1 MW	řádově 0,1 MW
Nabíjecí výkon	až 10 x menší než nabíjecí	řádově 1 MW	řádově 0,1 MW	řádově 0,1 MW
Kapacita baterií	řádově 1 MWh	řádově 1 MWh	řádově 1 MWh	řádově 1 MWh
Počet cyklů	< 3000 (závisí na hloubce vybití)	7 000 - 10 000	10 000 - 100 000	2 000 - 3 000
Účinnost	70 - 85 %	92 - 98 %	70 - 82 %	72 - 85 %
Životnost	5 - 15 let	10 - 20 let	10 - 20 let	10 - 15 let
Hloubka vybití	< 100%	100%	100%	100%
Cena	nízká	mírně vyšší	vysoká	vysoká
Využití	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Trakce ▪ UPS ▪ Automobily ▪ Podpora OZE 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Přenosná zařízení ▪ Elektromobily ▪ Regulace frekvence ▪ Podpora OZE 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Záložní zdroje ▪ Podpora OZE 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Podpora OZE
Výrobci	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Johnson Controls ▪ HOPPECKE ▪ Vatra ▪ Exide GNB ▪ další ... 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ LG Chem ▪ Toshiba ▪ Kokam ▪ Samsung ▪ další ... 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Imergy Power Systems ▪ GILDEMEISTER 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Redflow Energy Storage Solutions

Tabulka 2- Přehled základních parametrů bateriových technologií [19]

Průtočné baterie, jejichž technologie se podobá jak bateriím, tak i palivovým článkům. Zjednodušeně se jedná o dvě nádrže napuštěné pozitivním a negativním elektrolytem, které jsou odděleny membránou.

Proces nabíjení a vybíjení je realizován reakcemi mezi dvěma chemickými látkami rozpuštěnými v kapalině. Výhodou je velmi dlouhá životnost, nevýhodou je nižší energetická hustota.

Existuje několik typů těchto baterií, dle typu provedení je lze dělit například na hybridní (jednu ze složek mají v pevné podobě – baterie využívající zinek a brom či zinek a chlór), redoxní (všechny chemické komponenty aktivní při nabíjení i vybíjení v rozpuštěné podobě – např. vanadová redoxní, využití v elektromobilech).

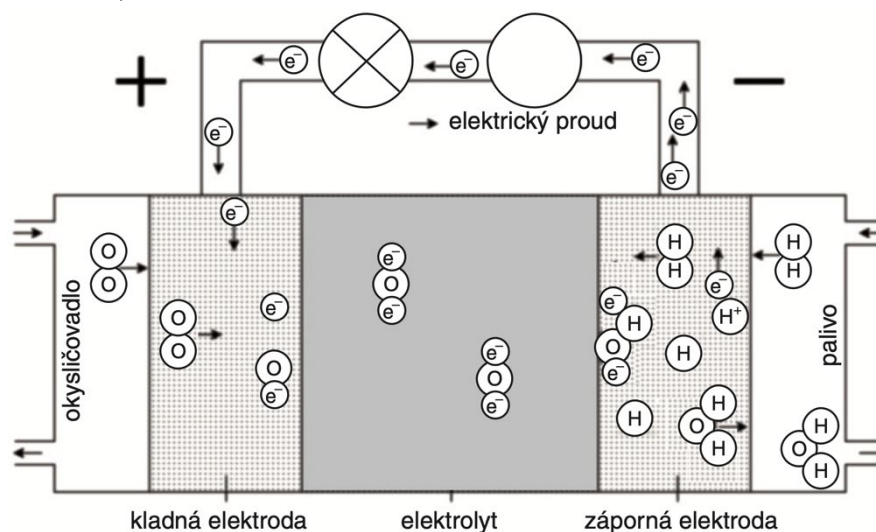
2.2.4 Chemické akumulátorové systémy

Vodík je možno vyrábět různými způsoby. Nejrozšířenější je výroba z fosilních paliv, kde se účinnost pohybuje od 35 do 80 %. Hlavní nevýhodou této výroby jsou vysoké emise. Dalším způsobem je výroba elektrolýzou vody (v současné době se takto vyrábí zhruba 4 % uhlíku). Klasická elektrolýza může dosáhnout účinnosti až 90 %, vysokoteplotní elektrolýza až 95 %. Nejčastěji se využívá tzv. PEM elektrolýzy, která využívá proton propustnou membránu. Systémem protéká čistá voda, není tedy potřeba dalších speciálních nároků na materiály. Nevýhodou je vysoká cena technologie¹⁰.

Palivový článek funguje na principu slučování molekul vodíku ze zásobníku a kyslíku ze vzduchu, přičemž produkuje teplo, elektřinu a vodu, dokud je palivo dostupné.

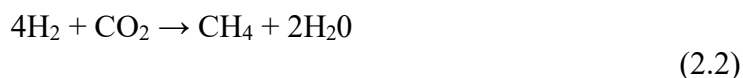
¹⁰ [50] TKÁČ, Martin a STEHLÍK, Karin. *Centrální výroba vodíku*. In: Chemické listy [online]. **111**(2), 121- 128. 2017 [cit. 2023-02-08]. ISSN 1213-7103. Dostupné z <http://www.chemicke-listy.cz/ojs3/index.php/chemicke-listy/article/view/31/31>

Palivový článek obsahuje dvě elektrody, mezi kterými je elektrolyt. K anodě je přiváděn vodík a ke katodě kyslík. Na anodě se nachází katalyzátor, který umožní rozštěpení atomu vodíku na elektron a proton. Proton prochází elektrolytem ke katodě, kde se společně s elektronem podílí na vzniku vody a tepla. Existuje mnoho typů palivových článků, např. PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell), AFC (Alcaline Fuel Cell), PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell), MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell), DMFC (Direct Methanol Fuel Cell)¹¹.



Obr. 8 - Schéma palivového článku [35]

Power to Gas technologie lze rozdělit na Power to Methan, Power to Ammonia a Power to Methanol. Power to Methan je velmi perspektivní akumulace ve směru elektromobility, methan pro spalovací motory se označuje CNG. Vodík produkovaný elektrolýzou vody a oxidu uhličitého ze vzduchu nebo zachycený ze spalin kotlů jsou sloučeny a přeměněny na metan reakcí zvanou methanizace:



Akumulace elektrické energie do amoniaku (Power to Ammonia) se omezuje na využití jako palivo v elektrárnách, které spalují zemní plyn. Výroba amoniaku probíhá nejprve elektrolýzou vody, při které vzniká vodík. Jednotka pro separaci vzduchu odebere ze vzduchu dusík. Pro syntézu vodíku s dusíkem je používán Harber Bosch reaktor, ve kterém plyny reagují a vzniká NH_3 .

2.2.5 Tepelné akumulátorové systémy¹²

Akumulace citelného tepla – jedná se o nejjednodušší metodu akumulace tepla založenou na ohřívání kapaliny nebo pevné látky bez změny skupenství. Nejčastěji se využívá vody, písku, kamenů nebo roztavených solí.

¹¹ [4] BUCHMANN, Insidor. *How does the Fuel Cell Work?* In: Batteryuniversity.com [online]. 2.5.2021 [cit. 2023-02-08]. Dostupné z: https://batteryuniversity.com/index.php/learn/article/fuel_cell_technology

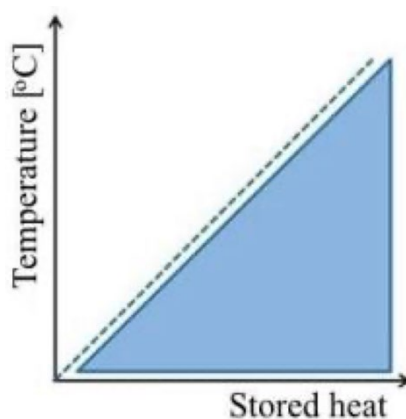
¹² [44] SABRU, Ioan, SEBARCHIEVICI, Calin. *A Comprehensive Review of Thermal Energy Storage* [online]. 14.1.2018 [cit. 2023-02-08]. ISSN 2071-1050. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/su10010191>

Výhoda takovéto akumulace je nízká cena, jednoduchost systému. Množství uloženého tepla závisí na hmotnosti akumulčního média a jeho měrné tepelné kapacitě.

$$Q_t = \int_{t_2}^{t_1} m \cdot c_p dt = m \cdot c_p (t_2 - t_1) \quad (2.3)$$

Kde:

- Q_t ... uskladněné teplo [J],
 m ... hmotnost akumulčního média [kg],
 c_p ... měrná tepelná kapacita [$J \cdot (kg \cdot K)^{-1}$]
 t_1, t_2 ... počáteční a koncová teplota [K].



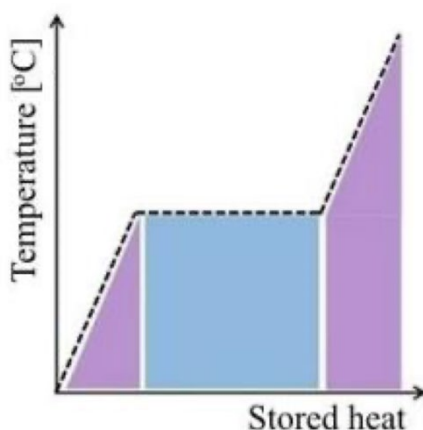
Obr. 9 - Závislost teploty na uloženém teple [44]

Akumulace latentního tepla - probíhá za stálého skupenství, ale i při změně z pevného na kapalné. Při přeměně skupenství je akumulováno teplo, ale teplota nestoupá (izotermický děj). Tím je dosaženo vyšší hustoty energie a menších rozměrů akumulátoru. Pro studenou akumulaci se využívá voda (led), pro střední teploty solné hydráty nebo různé polymery a pro vysokoteplotní akumulaci roztavené soli, kovové slitiny a vosky. Celková tepelná kapacita se vypočte podobně jako u akumulace citelného tepla, ale je nutné přičíst skupenské teplo potřebné ke změně skupenství.

$$Q_t = \int_{t_1}^{t_2} m \cdot c_{pp} dt + m \cdot l_t + \int_{t_2}^{t_3} m \cdot c_{pk} dt \quad (2.4)$$

Kde:

- t_t ... teplota tání [$^{\circ}C$],
 c_{pp} ... měrná tepelná kapacita pevného skupenství [$J \cdot (kg \cdot K)^{-1}$],
 c_{pk} ... měrná tepelná kapacita kapalného skupenství [$J \cdot (kg \cdot K)^{-1}$],
 l_t ... měrné skupenské teplo [$J \cdot kg^{-1}$].



Obr. 10 – Závislost teploty na uloženém teple [44]

2.2.6 Elektrické akumulční systémy

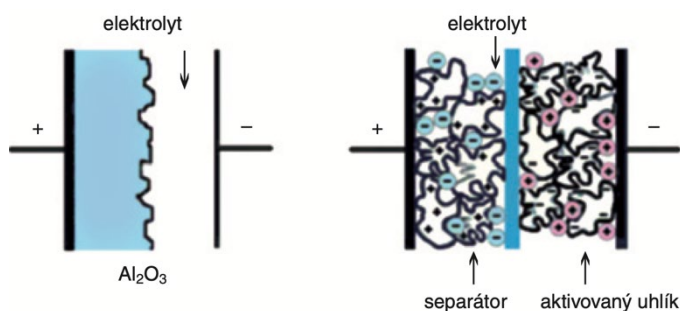
Superkapacitory¹³, někdy pojmenováváné jako ultrakapacitory nebo dvouvrstvé kapacity se vyznačují velkou kapacitou v jednotkách Farradů. Kondenzátor se skládá z organického elektrolytu mezi elektrodami z uhlíku. Elektrody jsou odděleny separátorem. Přiložením napětí na svorky kapacitoru se kationty elektrolytu přemísťují k negativní elektrodě a anionty k pozitivní. Tímto se vytvoří tzv. Hemholtzovy vrstvy (na rozdíl od baterií se zde využívá jen elektrostatických vlivů k uložení energie).

Rovnice pro její výpočet:

$$E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2 [W] \quad (2.5)$$

kde:

- C ... kapacita kapacitoru [F],
U ... napětí na svorkách kapacitoru [V].



Obr. 11 - Vnitřní uspořádání superkapacitoru [4]

Maximální napětí mezi elektrodami je dáno použitým elektrolytem a separátorem. Vyšší napětí však snižuje životnost kapacitoru, která je okolo 1 milionu vybíjecích cyklů. Velkou nevýhodou je vybíjecí křivka, která je prudce lineárně klesající. K optimalizaci jsou využívány DC/DC konvertory, které s klesajícím napětím odebírají více proudu. Naopak výhodou je absence ochrany přebíjení.

¹³ [4] BUCHMANN, Insidor. *How does a Supercapacitors Work?* In: Batteryuniversity.com [online]. Datum aktualizace: 8.12. 2020 [cit. 2023-02-08]. Dostupné z: https://batteryuniversity.com/learn/article/whats_the_role_of_the_supercapacitor

Kapacitory nacházejí uplatnění v aplikacích, kde nabíjecí a vybíjecí čas nepřesahuje 1 minutu a je potřeba akumulovat nebo uvolnit během krátké doby velký výkon při minimálních ztrátách (např. ve spojení se startovacími bateriemi lokomotiv, kde je kapacitor nabit z baterie malým proudem a pak lokomotiva nastartována velkým výkonem kondenzátorů).

Akumulace do pole cívky¹⁴ využívá supravodivost, kdy je do cívky přiveden proud, který v ní prochází dlouhou dobu téměř bez ztrát. Technologie je označována zkratkou SMES. Jedná se o technologii, která akumuluje elektrickou energii, aniž by ji měnila na mechanickou nebo chemickou. Díky tomu dosahuje účinnosti vyšší než 95 %. Energie se ukládá do elektromagnetického pole cívky.

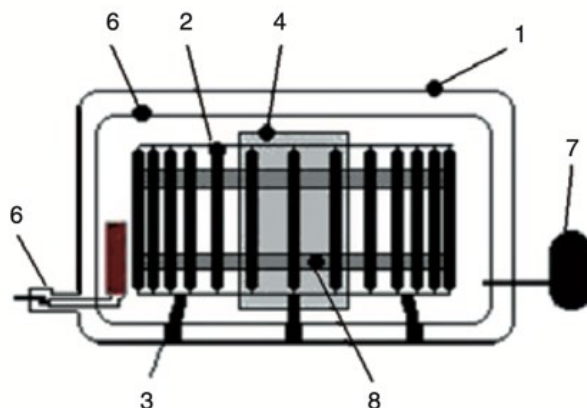
Lze využívat klasické supravodiče, které musejí být chlazeny tekutým heliem nebo vysokoteplotní supravodiče, které využívají tekutý vodík. Vyšší teplota zvyšuje cenu zařízení, na druhou stranu se snižují kryogenní ztráty. SMES je možno využívat k vyrovnání frekvenčních změn sítě, stabilizaci sítě nebo pro začlenění OZE do výroby.

Energii pole cívky lze vypočítat:

$$E = \frac{1}{2} LI^2 [W] \quad (2.6)$$

kde:

- L ... indukčnost cívky [H],
I ... proud cívkou [A].



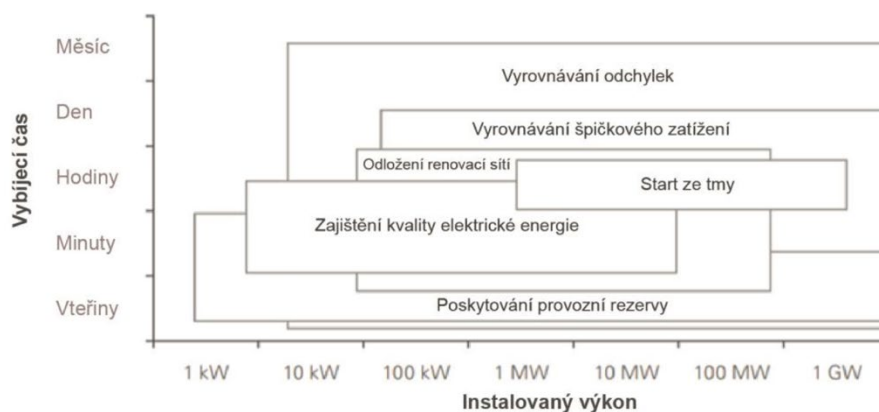
Obr. 12 - Schéma akumulace energie v magnetickém poli cívky [45]

¹⁴ [45] SANDER, Michael, GEHRING, Rainer, aj. *LIQHYSMES storage unit* [online]. In: 19. International Journal of Hydrogen Energy. 2012 [cit. 2023-02-08]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.07.019>

2.2.7 Porovnání akumulačních systémů

Technologie	Energetická hustota (Wh/l)	Výkon (MW)	Životnost (tisíc cyklů)	Samovybití (%)	Účinnost (%)	Reakční čas	Cena (Eur/kWh)
Mechanická akumulace							
PVE	0,5-3	0,5-1,5	-	-	70-85	min	40-150
Setrvačnick	20-80	0,001-20	20-100	30-100	98	<s	90
Stlačený vzduch	2-6	několik 100	-	-	40-80	min	50-150
Zkapalněný vzduch	32-230	0,005-650	22-30	-	50	5 min	60-600
Přečerpávání tepla	0,03-0,06	0,1-200	>15	*	70-75	ms-s	20
Baterie							
Olovené kyselinové	80	0,001-100	5	3	75-85	ms	100-200
Lithiové	260-500	0,001-50	2-10	3-9	90-98	ms	700-1300
Sodíkové	150-300	0,2-50	>4,5	1,5-100	80	ms	300-450
Niklové	60-220	0,001-několik	1-5	*	60-70	ms	400-1500
Kov-vzduch	700-1500	několik	*	*	75	ms	160
Průtočné baterie							
Vanadové	10-25	<3	12	6	60-85	ms	100-400
Zinko-bromidové	60-90	<1	2				
Železo-chromové	<10	0,005-několik	*				
Polysulfidové Brómové	20-30	<15	*				
Chemická akumulace							
Vodík	30-2550	0,001-1000	-	0-100	20-40	s-min	1-10
Elektromagnetická							
SMES	*	až 20	-	*	>95	*	*
Superkondenzátory	*	několik	1000	20-40	>90	5 ms	10000-20000
Tepelná							
SHS, LHS, TCS	80-220	Až 400	-	*	50-95	Několik s	0,1-100

Tabulka 3- Srovnání akumulačních systémů [30]



Obr. 13 - Jednotlivé typy aplikací s požadovanými parametry uložité [30]

Hlavními porovnávacími parametry pro akumulční zařízení jsou jmenovitý výkon a vybíjecí doba. Jmenovitý výkon popisuje okamžitou schopnost zařízení odebírat nebo dodávat energii do sítě a vybíjecí doba ukazuje čas potřebný k poskytnutí této energie. Vybíjecí doba se rovná přibližně kapacitě uložení podělené jmenovitým výkonem.

U některých aplikací vyžadujeme dlouhotrvající dodávku výstupního výkonu, u jiných naopak krátké dodávky vysokého výkonu. Tyto parametry jsou základním faktorem při posuzování vhodnosti daného uložení pro danou aplikaci. Na Obr. 13 jsou znázorněny příklady aplikací a k nim přiřazené rozsahy vybíjecích časů a instalovaného výkonu.

Li-ion baterie zaznamenaly v posledních letech obrovský nárůst poptávky a jejich vývoji byla teda věnována značná pozornost. Jak lze vidět v Tabulce 3, Li-ion baterie mají z porovnávaných technologií nejvyšší hustotu energie, účinnost 85 až 98 % a měrný výkon 1,3–10 kW*L⁻¹. Hustota energie a měrný výkon vypovídají o prostorovém rozložení baterie, tudíž Li-ion baterie s větším výkonem nemusí být tak velké jako ostatní typy baterií (to umožňuje finanční úspory na výrobu, instalaci, přepravu). Velkou výhodou je také rychlost nasazení, která se u bateriových uložení pohybuje v řádech jednotek měsíců od zahájení projektu. Baterie poskytují hned několik výhod v porovnání s ostatními technologiemi, přesto je jisté, že v budoucnu budou koexistovat s ostatními technologiemi. Lze tak očekávat používání baterií například s technologiemi schopnými skladovat elektřinu po delší dobu (pro vyrovnání rozdílu výroby v létě a zimě). Pro tyto potřeby je nutné efektivně skladovat elektřinu po několik měsíců, což na rozdíl od baterií nabízí např. P2G, PVE, CAES nebo ukládání tepla.

2.3 Využití bateriových systémů

V současné době je podíl obnovitelné energie na celkové spotřebě ČR cca 17 %, přičemž naprostá většina této energie pochází z různých forem biomasy. Za adekvátní příspěvek ke klimaticko-energetickým cílům EU v rámci ČR do roku 2030, je považován podíl 32-35 % obnovitelné energie. Zcela klíčový bude pro Česko rozvoj solární a větrné energetiky, který by mohl naplnit pomyslných 6,2 %, dále navýšení energetické účinnosti (akumulace, zateplení, elektromobilita), jejíž podíl by měl navýšit celkové skóre o 5,8 % a konečně využití udržitelné biomasy (např. dřevní či zemědělský odpad) v doplňkové roli jde o pomyslná 4 %¹⁵. Dále viz Obr. 14, 15.

Jak již bylo zmíněno výše, existují klimaticko-ekonomické cíle EU, které byly v roce 2022 po invazi Ruska na Ukrajinu obohaceny o tzv. REPowerEU, což je plán pro snížení závislosti na fosilních palivech z Ruska. Tento nový plán navyšuje podíl OZE oproti Fit for 55¹⁶ a Green Deal¹⁷ o dalších 5 % do roku 2030 a současně navrhuje snížení spotřeby energie o dalších 13 % v roce 2030. V lednu roku 2023 byl navíc představen Průmyslový plán Zelené dohody (Green Deal Industrial Plan), jehož cílem je podpořit inovace v evropském průmyslu směrem ke klimaticky neutrálním technologiím (dekarbonizace průmyslu) a posílit konkurenceschopnost evropských firem na globálním trhu.

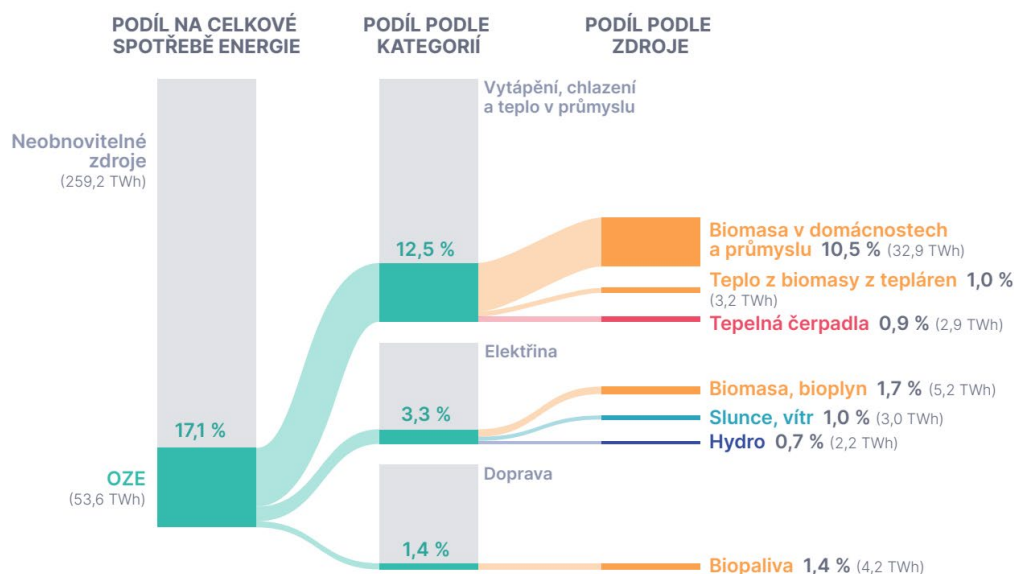
¹⁵ Všechna data jsou uvedena na základě studie: [29] KRČÁL, Jan; OTÝPKOVÁ, Laura a KOLOUCHOVÁ, Kateřina. Rozvoj obnovitelné energie v Česku do roku 2030: Pro posílení bezpečnosti a plnění klimatických cílů EU. Online. In: faktaoklimatu.cz. S. 42. Dostupné z: <https://faktaoklimatu.cz/assets-local/publications/2023-rozvoj-obnovitelne-energie-v-cesku-do-2030.pdf>. [cit. 2023-10-12]. Str. 2

¹⁶ Fit for 55 je legislativní balíček z roku 2021, který uvádí návrhy Zelené dohody v praxi, čímž by mělo dojít ke splnění cíle pro rok 2030 (-55 % emisí skleníkových plynů oproti roku 1990).

¹⁷ Green Deal (neboli Zelená dohoda pro Evropu) je plán z roku 2019 pro dosažení klimatické neutrality v EU do roku 2050 a 55 % snížení emisí skleníkových plynů do roku 2030 oproti roku 1990. Jde ruku v ruce s Evropským klimatickým zákonem (2021), který EU právně zavazuje dosáhnout klimatických cílů pro roky 2030 a 2050.

SOUČASNÝ STAV

Celková konečná spotřeba energie: 312,8 TWh



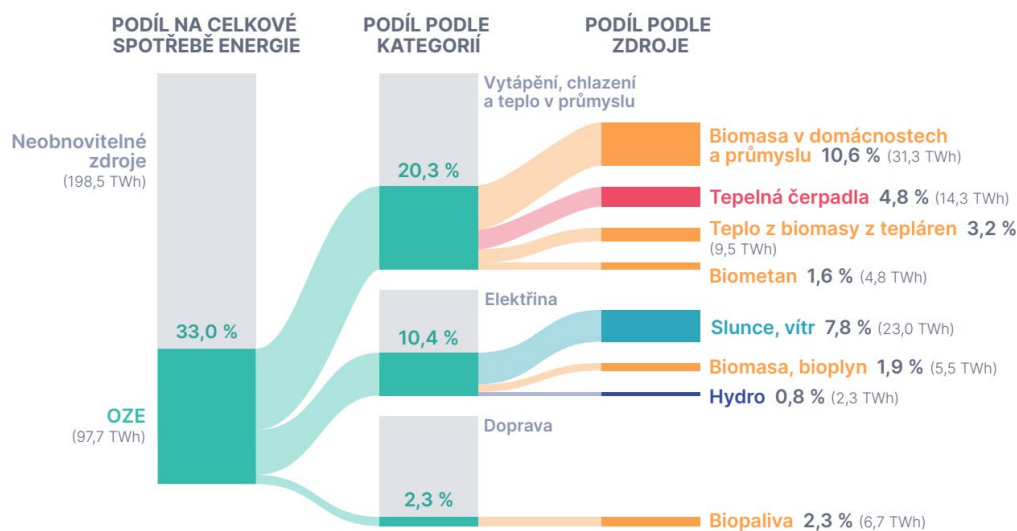
zdroj dat: Eurostat

Obr. 14- Současný stav energetického mixu ČR [29]

ČESKÁ ENERGETIKA V ROCE 2030

POKROČILÝ SCÉNÁŘ

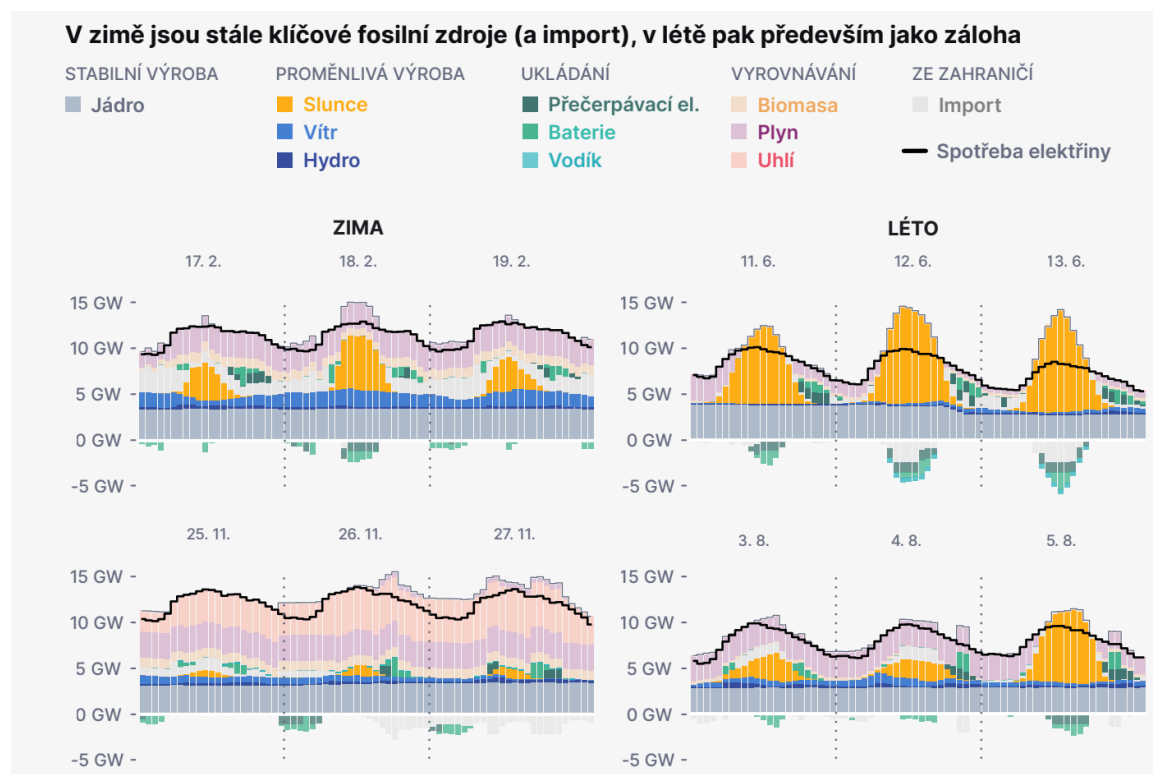
Celková konečná spotřeba energie: 296,2 TWh



Obr. 15- Scénář energetického mixu ČR pro rok 2030 [29]

Jak již bylo zmíněno na předešlých stránkách této práce, pro pokročilý scénář zapojování čím dál většího množství OZE do sítě, je třeba velmi pečlivě dbát na vyváženost výroby a spotřeby. Což lze dosáhnout několika nástroji.

V první řadě jde o dostatečné zazdrojování říditelnými zdroji (fosilní zdroje, studie ČEPS pro hodnocení zdrojové přiměřenosti¹⁸), dále je třeba rozšířit kapacitu pro ukládání elektřiny (akumulace, smartgrids), třetím nástrojem je export přebytků do okolních zemí a konečně, čtvrtým nástrojem je maření elektřiny (tedy omezování výroby z OZE).



Obr. 16- Rozložení výroby v čase - scénář pro rok 2030 [29]

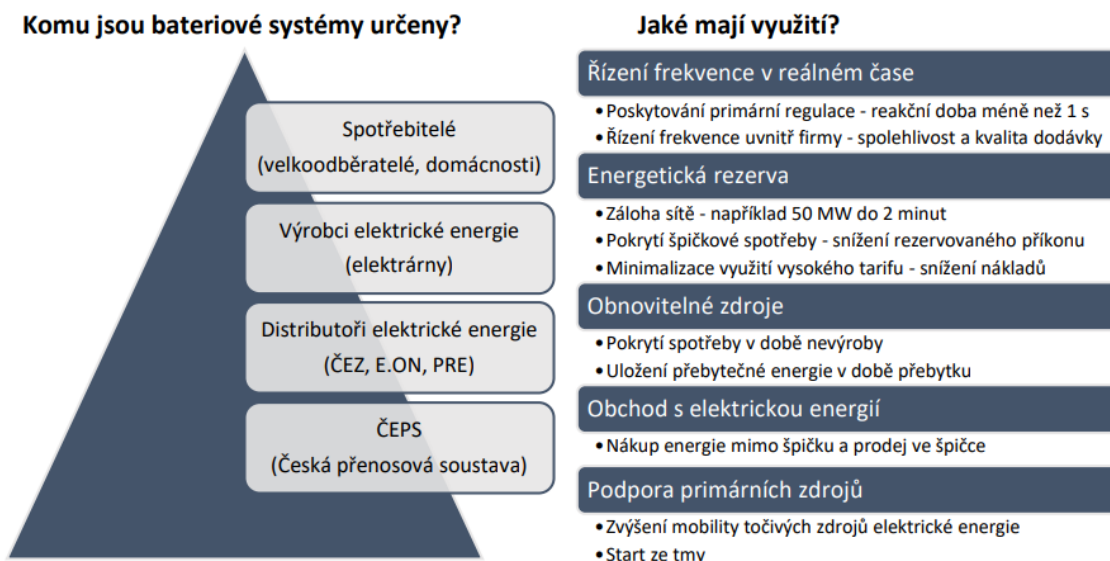
Jak je patrné z grafů výše, většinu zimy bude nutné doplňovat výrobu pomocí říditelných zdrojů (nejčastěji v oblasti teplárenství), stejně tak může pomáhat import přebytků větrné energie ze zahraničí. Dále si lze povšimnout, že i přes léto je potřeba nedostatečnou výrobu (nejčastěji přes noc) z fotovoltaických článků vyrovnávat produkcí z neobnovitelných zdrojů. Na toto konto se dostávají do popředí akumulační systémy. Nelze však očekávat výrazný rozvoj bateriové akumulace (ve scénáři pro rok 2030 by se jednalo o 2 GW nepokryté spotřeby), jelikož není cenově optimální. Baterie¹⁹ ovšem nabízejí i další přínosy od elektromobilů, využití pro přenosovou a distribuční soustavu, po decentralizaci.

Pokud jde o obecné využití bateriových systémů, vždy je důležité se ptát komu je systém určen a jaké je jeho využití. Schématický přehled možného využití bateriového systému viz Obr. 17 níže. V praxi by pak mohl bateriový systém mít některé z konkrétních využití také níže²⁰.

¹⁸ [8] ČEPS. Hodnocení zdrojové přiměřenosti ES ČR do roku 2040: (MAF CZ). Pdf. 2022.

¹⁹ I při výrazném rozvoji elektrolyzérů bude potenciál výroby vodíku v Česku v roce 2030 omezený: [33] MADEJ, Martin a SRB, Jáchym. Role vodíku v zajištění energetické bezpečnosti ČR v kontextu dekarbonizace ekonomiky: Klimatický paper č. 10. Online. In: Amo.cz. S. 29. Dostupné z: https://www.amo.cz/wp-content/uploads/2021/05/AMO_Role_vodik_v_zajistení_energetické_bezpečnosti_CR_.pdf. [cit. 2023-10-12].

²⁰ [19] HAVLÍK, Daniel. Využití bateriových systémů pro poskytování Podpůrných služeb. Online, Diplomová. Praha: ČVUT FEL. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/68479/F3-DP-2017-Havlik-Daniel-Diplomova%20prace_Daniel%20Havlik.pdf?isAllowed=y&sequence=1. [cit. 2023-10-18]. Str. 15, 16



Obr. 17- Schématický přehled využití bateriového systému [19]

Možné konkrétní příklady využití²¹:

- Bateriový systém pro primární regulaci frekvence (na úrovni distribuční sítě).
 - Řízení frekvence v reálném čase, v případě využití vlastníkem přenosové soustavy přináší snížení nákladů na nákup síťových služeb.
 - Nevýhodou je nutnost dobíjení baterií – omezení častého využívání.
- Bateriový systém jako energetická rezerva (na úrovni velkoobchodatele).
 - Záloha pro případ výpadku ES, možnost startu ze tmy, pokrytí špičkové spotřeby (snížení rezervovaného příkonu).
 - Nevýhodou je vysoká cena velkých bateriových systémů.
- Bateriové systémy pro domácnost (např. s FV panely).
 - Uložení přebytečné energie a pozdější využití v době nevýroby, minimalizace spotřeby ve vysokém tarifu.
 - Battery–trading = využití baterie ke zlepšení a optimalizaci možností a přebytků.
 - Nevýhodou je poměrně nízká návratnost investic do baterií.
- Vysokokapacitní bateriový systém pro využití na trhu s elektřinou.
 - Možnost dobíjení = nákup energie mimo špičku a vybíjení = prodej energie ve špičce (=load shifting).
 - Peak shaving = výkon se v době největších výkonových špiček vyhladí pomocí baterie a při nízkém výkonu se pak baterie nabíjí -> snížení patnácti minutového maxima a náhlých nárůstů odběru energie.
 - Nevýhodou je vysoká investice.
- Bateriový systém jako podpora konvenčních zdrojů elektřiny.
 - Zvýšení mobility dodávaného výkonu, možnost startu ze tmy.
 - Smoothing = baterie vyrovnává výkony a konstantně vyhlazuje křivku zátěže.

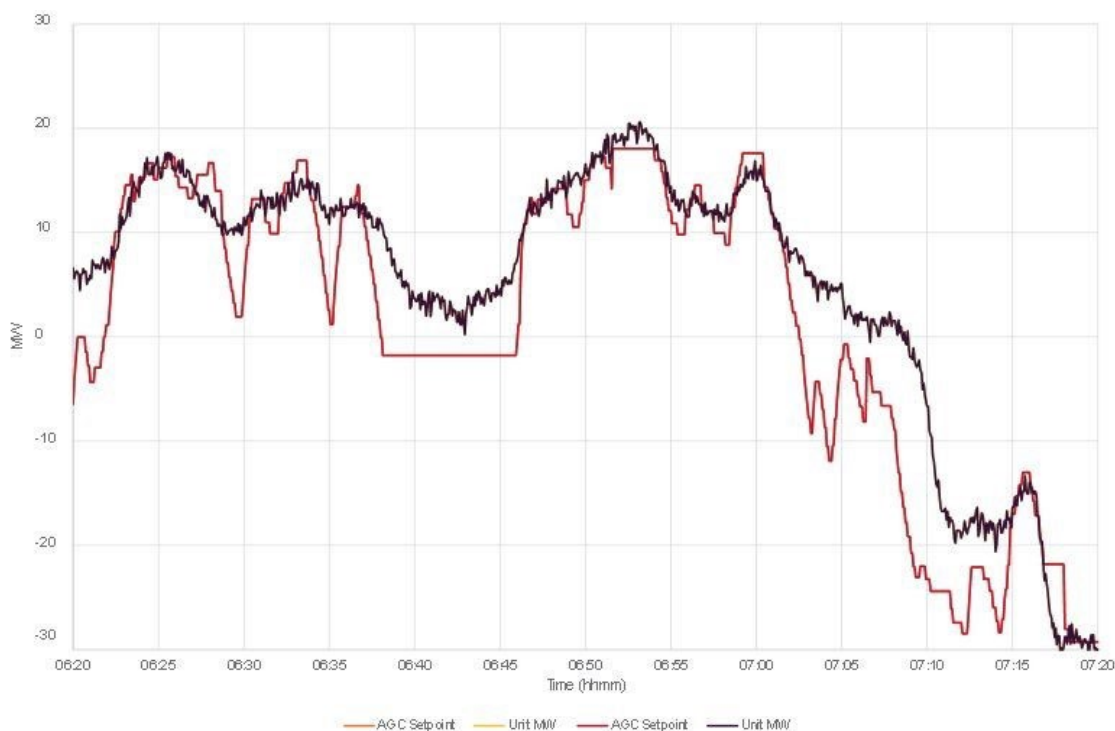
²¹ [19] HAVLÍK, Daniel. Využití bateriových systémů pro poskytování Podpůrných služeb. Online, Diplomová práce. Praha: ČVUT FEL. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/68479/F3-DP-2017-Havlik-Daniel-Diplomova%20prace_Daniel%20Havlik.pdf?isAllowed=y&sequence=1. [cit. 2023-10-18]. Str. 16

2.3.1 Možné využití baterií v přenosové soustavě

Baterie v přenosové soustavě lze jednoduše zařadit k podpůrným službám (PpS). PpS jsou prostředkem provozovatele přenosové soustavy (ČEPS) pro zajištění Systémových služeb. Aktivací podpůrných služeb (s výjimkou primární regulace frekvence bloku) dochází k dodávce regulační energie, čímž je vyrovnávána Systémová odchylka. Podpůrné služby jsou nabízeny subjekty připojenými do elektrizační soustavy (ES), které mohou PpS nabízet po splnění technických a obchodních podmínek stanovených provozovatelem přenosové soustavy na základě certifikace.

Nákup PpS lze realizovat na volném trhu prostřednictvím denního trhu (DT PpS), prostřednictvím výběrového řízení (VŘ) či na základě přímé smlouvy s poskytovatelem PpS (konkrétně jde o sekundární regulaci U/Q, schopnost ostrovního provozu, start ze tmy). Kategorie PpS nakupované na DT či pomocí VŘ jsou primární regulace frekvence bloku, sekundární regulace výkonu bloku, minutová záloha 5-minutová (MZS), minutová záloha 15-minutová kladná (MZ15+), minutová záloha 15-minutová (MZS15-), snížení výkonu (SV30)²².

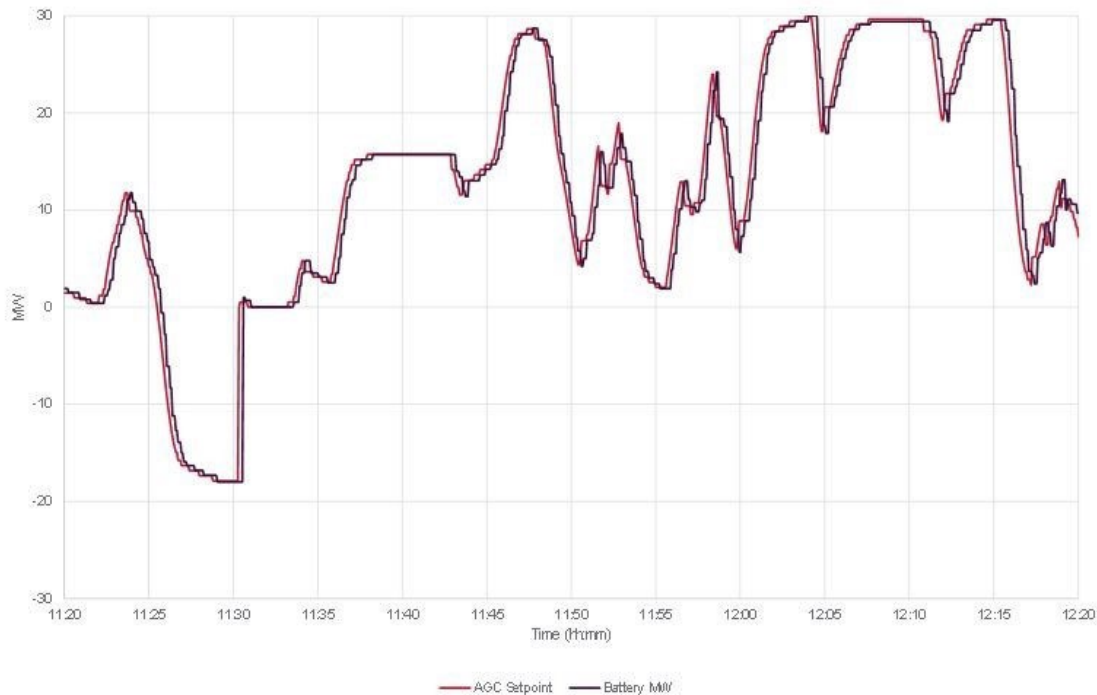
Platí, že čím větší je počet poskytovatelů PpS, tím náklady na podpůrné služby klesají. Přičemž baterie dokáže na změny stavu v síti reagovat rychleji než klasické točivé stroje. Viz Obr. 18 a Obr. 19, kde červená linka zobrazuje požadavek na činný výkon a kmitočet, černá linka reakci elektrárny/baterie²³.



Obr. 18- Reakce na pokyn dispečinku standardní elektrárny s turbínou a generátorem [64]

²² [9] ČEPS a.s., „KODEX PŘENOSOVÉ SOUSTAVY Část 2. Podpůrné služby (PpS)“, s. 214, 2016. [cit. 2023-10-18]

²³ [64] ZILVAR, Jirí. Baterie při poskytování podpůrných služeb šetří miliony dolarů. Jak to dělají? Online. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektriny/22413-baterie-pri-poskytovani-podpurnych-sluzeb-setri-miliony-dolaru-jak-to-delaji>. [cit. 2023-10-18].



Obr. 19- Reakce baterie na pokyn dispečinku [64]

V elektrizační síti musí platit okamžitá bilance zdánlivých výkonů. V každém okamžiku musí být výkon dodávaný do sítě roven výkonu ze sítě odebíranému. Bilanční rovnice výkonů má následující tvar:

$$S_v(t) = S_s(t) + S_z(t) + S_a(t) [VA] \quad (2.7)$$

kde S_v ... je zdánlivý vyrobený výkon [VA],
 S_s ... je zdánlivý spotřebovaný výkon [VA],
 S_z ... je zdánlivý ztrátový výkon [VA],
 S_a ... je zdánlivý akumulovaný výkon [VA].

V případě, že by se jeden ze zdrojů elektrické energie odpojil od sítě, byla by porušena bilanční rovnice. Na poruchu by síť reagovala snížením frekvence sítě. Tato reakce je z pohledu kvality elektrické energie (viz norma ČSN EN 50160 „Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané do veřejné distribuční sítě“) nepřipustná, a proto je třeba frekvenci regulovat. Regulace frekvence se v praxi využívá trojího typu, které se od sebe liší rychlostí reakce. Primární, sekundární a terciární.

Primární regulace frekvence bloku (PR) je dle Kodexu ČEPS definována jako automatická funkce spočívající v přesné změně výkonu v závislosti na odchylce frekvence od jmenovité hodnoty, požadovaná změna výkonu se řídí následující rovnicí:

$$\Delta P = \frac{-100P_n}{\delta * f_n} \Delta f \quad (2.8)$$

kde ΔP ... požadovaná změna výkonu bloku [MW],
 δ ... statika primární regulace [%],
 P_n ... jmenovitý výkon bloku [MW],

- f_n ... jmenovitá frekvence [Hz],
 Δf ... odchylka frekvence od jmenovité [Hz].

Povinností poskytovatele této služby je zajistit uvolnění požadované regulační zálohy do 30 sekund od příchodu požadavku. Průběh PR je velmi proměnlivý (regulace dle situace v síti velmi rychle přepíná mezi požadavky na kladnou a zápornou dodávku do soustavy). Tím tedy PR nezatěžuje bateriový systém hlubokými cykly, což má dobrý vliv na životnost baterií. Minimální výkon pro poskytování primární regulace je 3 MW, maximální 10 MW – toto výkonové rozpětí je pro bateriové systémy snadno dosažitelné. Dle Tabulky 2 v Kapitole 2.2.3 lze odvodit, že pro poskytování PR je nejuvhodnější využití lithiových baterií za předpokladu znalosti křivky PR v místě instalace systému.

Sekundární regulace výkonu bloku (SR) je definována jako změna výkonu bloku dle požadavků regulátoru frekvence dle salda výkonu. Povinností poskytovatele této PpS je provést změnu výkonu nejpozději do 10 minut od příchodu požadavku. Je zavedena minimální požadovaná rychlost změny výkonu bloku, a to 2 MW/min. SR tedy klade velké nároky na výkonové toky – může docházet k častým hlubokým cyklům, což má negativní vliv na životnost baterií. Dle Tabulky 2 v Kapitole 2.2.3 by bylo možné nasadit vanadium – redoxové baterie, která je schopná největšího počtu hlubokých cyklů.

Problémem je vysoká cena a nízká účinnost (tj. vysoké ztráty). Momentálně se tedy baterie pro zajištění SR nevyužívají.

Minutová záloha MZ5, MZ15+, MZ15 – je definována jako regulační záloha (RZMZt) poskytována výrobním blokem do t minut od požadavku provozovatele přenosové soustavy. Tato záloha je poskytována změnou výkonu na výstupních svorkách zařízení. RZMZt+ může být realizována zvýšením výkonu bloku, odpojením čerpání, odpojením zatížení od ES. RZMZ – může být realizována snížením výkonu bloku či připojením zatížení do ES.

Minutová záloha bývá aktivována jen několikrát do roka (desítek aktivací/rok). Díky nízkému počtu aktivací nedochází k přetěžování baterií. Požadovaný minimální výkon pro poskytování této služby je 30 MW pro MZ5 a 10 MW pro MZ15+, MZ15-. Z hlediska dostupných baterií se jedná o velké výkony, které by nebyly investičně výhodné. Ideální pro poskytování RZMZt je kombinace bateriového systému a klasického zdroje elektrické energie – bateriový systém může sloužit jako krátkodobé zastoupení klasického zdroje v prvních okamžicích aktivace, do okamžiku, kdy konvenční zdroj nedosáhne požadovaného výkonu. Dle Tabulky 2 v Kapitole 2.2.3 by bylo vhodné využít lithiové baterie, které jsou vhodné v kombinaci s konvenčním zdrojem.

Snížení výkonu (SV30) je poskytováno výrobními bloky, které jsou do 30 minut schopny částečného snížení výkonu, nebo úplného odstavení. Využití této služby o minimální velikosti 30 MW musí být poskytovatelem v případě aktivace garantováno po dobu 24 hodin.

Bateriový systém, který poskytuje tuto službu by musel kontinuálně dodávat energii do soustavy, takový provoz je nevýhodný a nesmyslný. Z tohoto důvodu se baterie na pokrytí této služby nepoužívají.

Sekundární regulace U/Q (SRUQ) je automatická funkce, která využívá celý certifikovaný regulační rozsah jalového výkonu pro udržení zadané velikosti napětí.

Regulační proces by měl být dle Kodexu ČEPS²⁴ aperiodický nebo minimálně s jedním překmitem, ukončený do 2 min.

SRUQ je realizovatelné pomocí baterií, ale hlavní důraz je kladen na střídač, jehož účinnost musí být minimální. Jsou tedy vhodné všechny typy baterií, nevýhodou je jen nízká cena regulační energie (viz Tabulka 4²⁵) pro SRUQ (výhodné by bylo, kdyby bateriový systém poskytoval více PpS najednou).

Ceny regulační zálohy	Vážené průměry cen PpS v Kč/MW										
	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Primární regulace (PR)	868	869	872	465	761	822	732	633	653	674	684
Sekundární regulace (SR)	917	904	859	793	743	793	703	633	674	688	718
Minutová záloha 15-ti minutová (MZ15+)						386	354	225	207	199	201
Minutová záloha 15-ti minutová (MZ15-)	-	-	-	-	-	353	295	278	218	213	215
Minutová záloha 5-ti minutová (MZ5)	-	-	-	-	-	-	-	519	500	501	506
Dispečerská záloha (DZt)	378	376	408	-	-	-	-	-	-	-	-
Terciální regulace kladná (TR+)	524	561	586	392	412	-	-	-	-	-	-
Terciální regulace záporná (TR-)	329	348	344	337	364	-	-	-	-	-	-
Rychle startující záloha 15-ti minutová (QS15)	-	-	371	409	399	-	-	-	-	-	-

Tabulka 4- Ceny za poskytování regulační zálohy [19]

Schopnost ostrovního provozu (OP). Jedná se o schopnost provozu elektrárenského bloku do vydělené části vnější sítě tzv. ostrova. Ostrovní provoz se vyznačuje velkými nároky na regulační schopnosti bloku.

Blok je převeden do ostrovního provozu, pokud frekvence klesne pod 49,8 Hz nebo vzroste nad 50,2 Hz. Blok pak musí být schopen pracovat v ostrovním provozu minimálně po dobu 2 hod. Lze tedy uplatnit bateriové systémy, které mohou stabilizovat odloučenou síť – k regulaci frekvence, vyrovnání výkyvů a podporovat stabilitu sítě při opětovném připojování, v případě přímého využití baterií v ostrovním provozu nelze pokládat jejich nasazení za výhodné.

Start ze tmy (BO) znamená schopnost bloku najet bez vnějšího zdroje napětí. Blok pak musí dosáhnout jmenovitého napětí, musí být připojen k síti a napájet jí v režimu ostrovního provozu.

V případě této PpS má smysl instalovat bateriové systémy jako podporu konvenčních zdrojů.

Baterie hrají zásadní roli při blackoutech (nepředvídatelné výpadky elektrické energie v síti), jelikož mohou poskytovat několik důležitých funkcí nejen při podpoře konvenčních zdrojů díky jejich rychlé reakci na výkyvy v síti, čímž mohou pomoci při udržení stability frekvence a předejít tak poškození elektroenergetické sítě. Dají se využít jako záložní napájení v kritických zařízeních (nemocnice, záchranné služby, telekomunikační zařízení) a nahradit tak některé záložní zdroje.

²⁴ [8] ČEPS a.s., „KODEX PŘENOSOVÉ SOUSTAVY Část 2. Podpůrné služby (PpS)", s. 214, 2016. [cit. 2023-10-18]

²⁵ [19] HAVLÍK, Daniel. Využití bateriových systémů pro poskytování Podpůrných služeb. Online, Diplomová. Praha: ČVUT FEL. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/68479/F3-DP-2017-Havlik-Daniel-Diplomova%20prace_Daniel%20Havlik.pdf?isAllowed=y&sequence=1. [cit. 2023-10-18]. Str. 24

2.3.2 Možné využití baterií v distribuční soustavě²⁶

Hladina VVN (rozvodna 110 kV/vn). Na této úrovni se jedná o zajištění smluvených parametrů činného a jalového výkonu mezi poskytovatelem přenosové soustavy (PPS) a poskytovatelem distribuční soustavy (PDS) v předávacím bodě. V době, kdy by mělo docházet ke zvýšeným přetokům z DS do PS by se akumulací systém nabíjel, a naopak. Z důvodu potřeby vysoké účinnosti a velkému nároku na počet cyklů jsou nejvhodnější li-ion akumulátory.

Hladina VN. V tomto případě je využití bateriového systému vhodné například jako náhrada za přenosovou trať při práci na vedení. Další možností je využití bateriového systému pro bilancování výkonů vyroben připojených do hladiny vn (tj. OZE, jejichž výroba je nepředvídatelná). Pro tyto účely by opět byly nejvhodnější li-ion akumulátory.

Hladina NN. Zde se nabízí možnost využití akumulace přímo zákazníkem (např. ukládání elektrické energie z fotovoltaiky), jde tedy o systémy ve vlastnictví zákazníka. Pokud by se jednalo o systémy ve vlastnictví distributora, šlo by o mobilní akumulací systémy, které dokáží přechodně dodávat elektrickou energii během odstávek. Toto opatření by vedlo ke zvýšení komfortu zákazníka a teoreticky i ke zlepšení ukazatelů spolehlivosti dodávek.

Energetický regulační úřad (ERÚ) sleduje ukazatele spolehlivosti dodávek elektrické energie, které jsou následně vyhodnocovány a je vyžadováno jejich postupné zlepšování. Jedná se o následující 3 systémové ukazatele²⁷:

- SAIFI (System Average Interruption Frequency Index) – průměrná četnost dlouhodobých přerušení na jednoho zákazníka za definované časové období.
 - $SAIFI = \frac{\sum j n_j}{N_c}$ (počet přerušení/rok/zákazník), (2.8)
 - kde n_j ... celkový počet zákazníků postižených přerušením
 N_c ... celkový počet zákazníků na hladině
- SAIDI (System Average Interruption Duration Index) – průměrná celková doba trvání dlouhodobých přerušení na jednoho zákazníka za definovanou dobu.
 - $SAIDI = \frac{\sum j (n_j * t_j)}{N_c}$ (minut/rok/zákazník) (2.9)
 - kde t_j ... střední doba přerušení skupiny postižených zákazníků
- CAIDI (Customer Average Interruption Duration Index) – průměrná doba trvání jednoho dlouhodobého přerušení na jednoho zákazníka za definovanou dobu.
 - $CAIDI = \frac{SAIDI}{SAIFI}$ (minut/přerušení) (2.10)

2.3.3 Integrace bateriového systému se smart grids

Smart grid (chytrá síť) je moderní a inovativní koncept v energetice, který se využívá především u fotovoltaických elektráren a dalších obnovitelných zdrojů. Jedná se o pokročilý systém řízení a správy elektrické sítě, který využívá technologie informačních a komunikačních technologií (ICT) k efektivnímu a inteligentnímu řízení dodávky elektřiny.

²⁶ [13] DRTINOVÁ, Kateřina. Akumulace elektrické energie a její využití v distribuční síti. Online, Diplomová, vedoucí Ing. Jan Švec, Ph.D. Praha: ČVUT FEL. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/76290/F3-DP-2018-Drtinova-Katerina-Akumulace%20elektricke%20a%20jeji%20vyuziti%20v%20distribucni%20siti.pdf?isAllowed=y&sequence=-1>. [cit. 2023-10-18]. Str. 44, 45

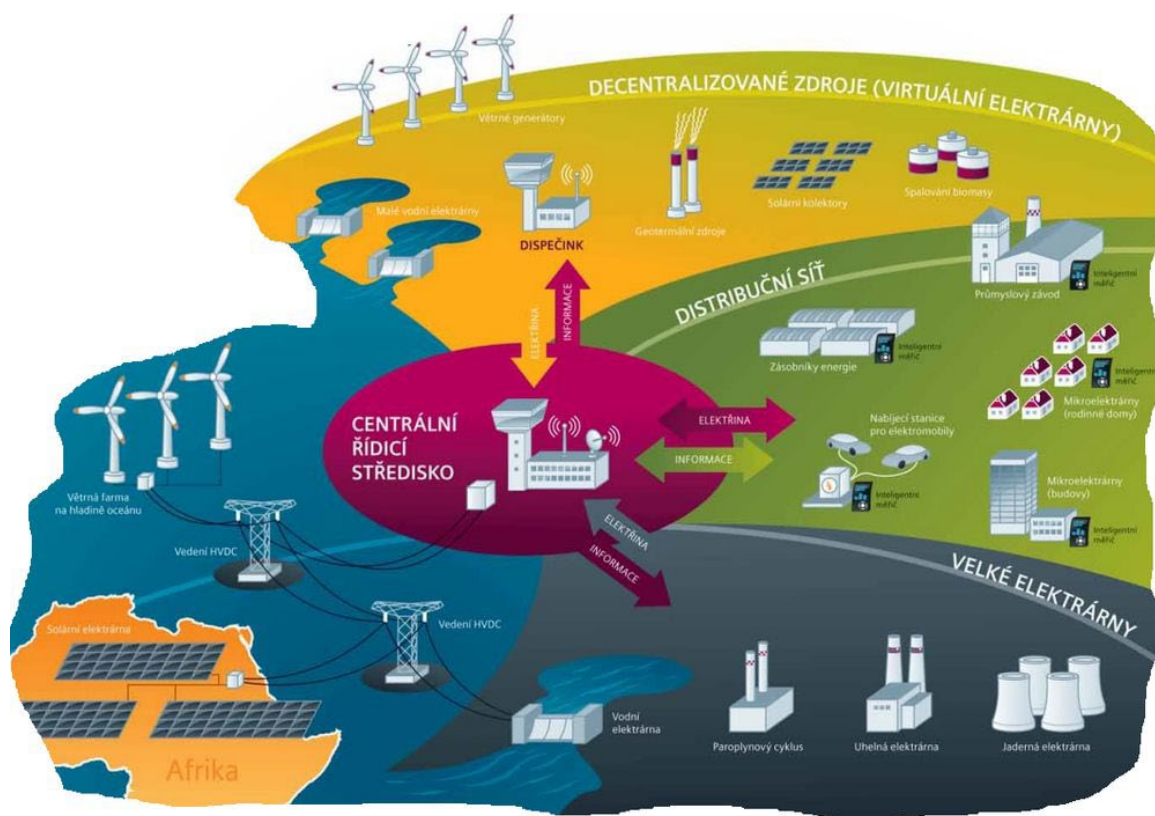
²⁷ [41] PROVOZOVATELÉ DISTRIBUČNÍCH SOUSTAV. Pravidla provozování distribučních soustav - příloha č.2 (METODIKA URČOVÁNÍ PLYNULOSTI DISTRIBUCE ELEKTRINY A SPOLEHLIVOSTI PRVKŮ DISTRIBUČNÍCH SÍTÍ). ČEZ Distribuce. [Online] 12 2008. [Cit. 2023-10-18.]

http://www.cezdistribuce.cz/edee/content/file-other/distribuce/energetickalegislativa/ppds/2009/ppds2009_priloha_2.pdf.

Hlavním cílem je zlepšit spolehlivost, efektivitu a udržitelnost elektrického systému tím, že umožní aktivní interakci mezi výrobcí elektřiny a spotřebiteli. Díky inteligentnímu sběru dat, automatizovanému řízení a využití informací o aktuální spotřebě a produkci elektřiny umožňuje smart grid optimalizovat tok elektřiny a snižovat ztráty v síti. Klíčové prvky a funkce smart gridu jsou²⁸:

- monitoring a řízení,
- efektivní distribuce (minimalizace ztrát v síti),
- demand response (reagování na poptávku),
- integrace do celkového energetického systému,
- využití energetických uložišť.

Chytrá síť přinese širší nabídku tarifů a možnost odebírat elektřinu v časech, kdy je levná. Nízké tarify budou vhodné i pro nabíjení akumulátorů (např. elektromobilů), naopak v čase vysokých tarifů se bude část energie čerpat z akumulátorů nabitých levnou energií. Díky těmto úsporám může spotřeba v domácnostech klesnout až o 10-15 %²⁹.



Obr. 20- Schéma (princip) fungování chytré sítě [15]

Důležitou součástí pro rozvoj smart grids jsou mikrosítě³⁰.

Mikrosítě je organizovaný energetický systém složený z několika decentralizovaných zdrojů elektrické energie, a to obnovitelných i konvenčních. Oproti konvenčnímu způsobu generace elektřiny ve velkých elektrárnách a následnému přenosu přes elektrická vedení

²⁸ [15] ENERGOSOLAR. Smart grid (chytrá síť). Online. Dostupné z: <https://www.energ solar.cz/smart-grid-chytra-sit>. [cit. 2023-10-18].

²⁹ [40] PLCHÚT, Martin. Co je Smart Grid? Online. In: TZB-INFO. Dostupné z: <https://elektro.tzb-info.cz/12544-co-je-smart-grid>. [cit. 2023-10-18].

³⁰ [21] HOUFKOVÁ, Anna; MALÍK, Čeněk a KUBIČKA, Josef. Rozbor vybraných konceptů Smart Grids. Semestrální práce. Praha: ČVUT FEL. Str. 10

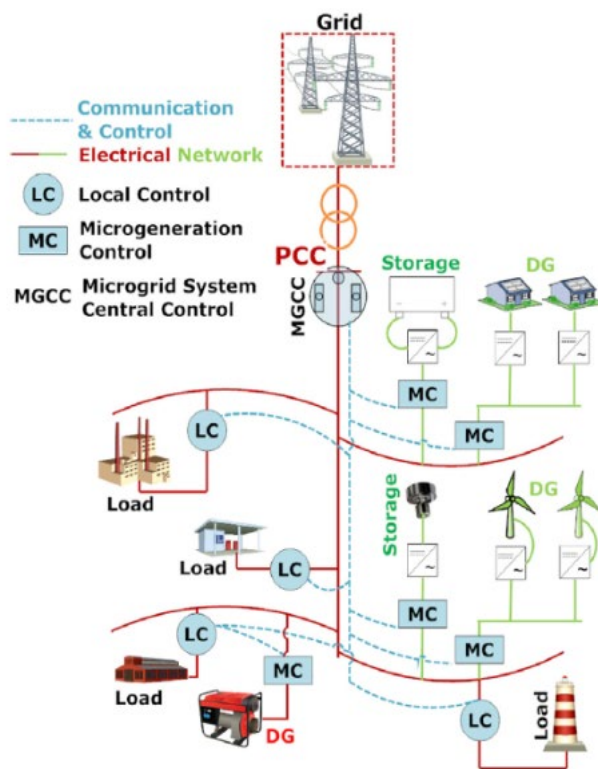
nabízí mikrosítě mnoho výhod, mezi které patří vyšší lokální spolehlivost dodávky, vyšší kvalita energie, nižší emise díky snazší integraci obnovitelných zdrojů nebo vyšší účinnosti díky menším přenosovým ztrátám na podstatně kratších vedeních. Nevýhodou je potřeba komplexních rozhraní výkonové elektroniky a řídicích systémů pro každý decentralizovaný zdroj, které musí zajistit, že se celý systém chová obdobně jako konvenční zdroje z hlediska spolehlivosti, stability a kvality elektrické energie.

Mikrosít' se skládá ze čtyř základních částí, graficky viz Obr. 21:

- distribuční systémy,
- decentralizované zdroje,
- úložiště energie,
- řídicí a komunikační systémy.

Obr. 21 ukazuje typický příklad mikrosítě, která může být připojena k distribuční soustavě nebo být zcela samostatná a pracovat v ostrovním režimu.

Z hlediska typu napětí se standardně dělí na stejnosměrné (DC) a střídavé (AC). Dále můžeme mikrosítě rozdělit podle typu decentralizovaných zdrojů nebo zda obsahují nebo neobsahují uložení elektrické energie. Z hlediska jednotlivých prvků se mikrosít' skládá z decentralizovaných zdrojů energie, a to jak z malých elektráren, tak i z různých druhů uložení. Každý zdroj má buďto svou řídicí jednotku nebo celý provoz mikrosítě zajišťuje centrální řídicí jednotka.



Obr. 21- Architektura mikrosítě [21]

Virtuální elektrárny (VPP)³¹, jejichž definice není pevně stanovena, nejlépe lze VPP specifikovat jako „inteligentnější“ a komplexnější mikrosít' (hlavní rozdíly jsou naznačeny na Obr. 22). Současné architektury VPP uvažují jednu centrální řídicí platformu, která bezdrátově sbírá data, komunikuje a řídí všechny prvky soustavy.

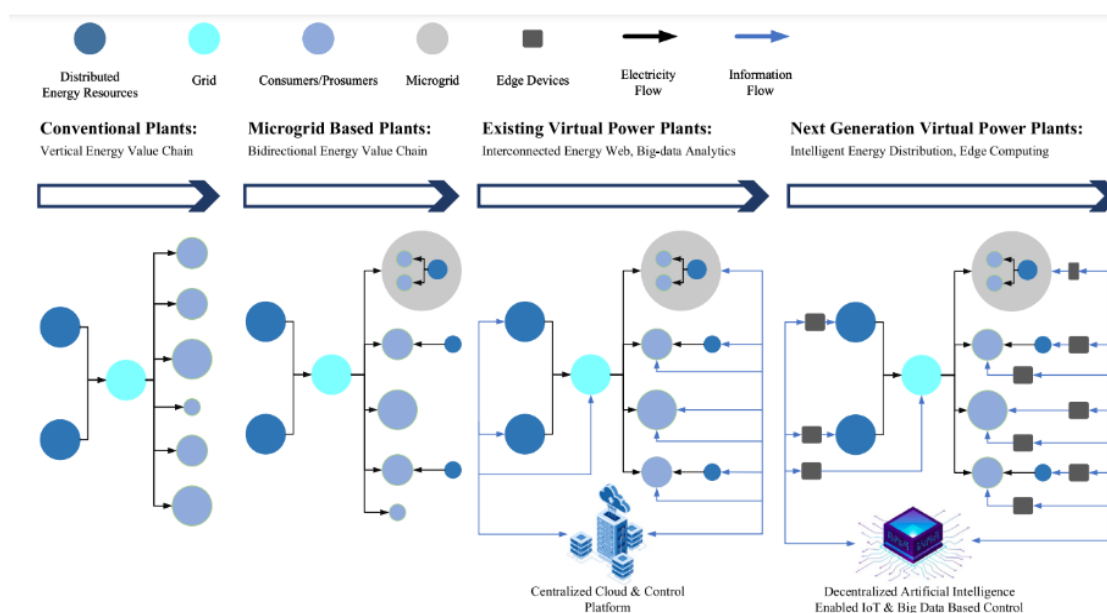
³¹ [21] HOUFKOVÁ, Anna; MALÍK, Čeněk a KUBIČKA, Josef. Rozbor vybraných konceptů Smart Grids. Semestrální práce. Praha: ČVUT FEL. Str. 20

Nová generace VPP předpokládá ještě komplexnější strukturu využívající tzv. edge computing, kdy jsou výpočetní jednotky umístěny co nejbližší zdrojům dat pro minimální časové prodlevy. Komunikace mezi všemi výpočetními jednotkami je zprostředkována pomocí IoT (Internet of Things) a rozsáhlé decentralizované softwarové struktury na bázi AI.

Virtuální elektrárnu lze rozdělit na dvě hlavní části: komerční (CVPP) a technická (TVPP). Hlavním cílem komerční virtuální elektrárny je ekonomická optimalizace. Zabývá se analýzou rizik, provozních nákladů a zisku za dodávku energie a nabídku služeb chytré sítě. Základní princip operace CVPP je pro všechny víceméně totožný. Nejprve jsou ekonomicky zhodnoceny všechny zdroje v rámci virtuální elektrárny, na základě čehož je každému přiřazena priorita. Poté CVPP nasbírá informace o trhu (požadavky spotřeby, historické strategie dalších účastníků trhu atd.) a vyprodukuje optimální profil generace pro každý zdroj.

Poté odešle operátorovi trhu svou bidding strategii, který provede vyčištění trhu. Podle výsledků vyčištění je profil plánované generace optimalizován a finální verze je odeslána operátorovi pro bezpečnostní kontrolu.

V případě porušení předpisu je plán přehodnocen a vygenerován nový. Mimo interakci s operátorem trhu se navrhované modely zabývají i různými dohodami mezi odběrateli a vlastníky decentralizovaných zdrojů buďto v rámci jedné virtuální elektrárny nebo mezi různými virtuálními elektrárnami případně uzavřením spolupráce s distributory.



Obr. 22- Srovnání struktury konvenčních elektráren, mikrosítí a VPP [21]

Technická virtuální elektrárna se zabývá řešením komplexních technických problémů v oblasti spolehlivého a optimálního provozu sítě. Tyto problémy jsou velmi podobné jako v případě mikrosítí, tudíž se jedná o optimalizaci toku výkonů, komunikační protokoly, analýzu technické proveditelnosti navrhovaných řešení a zajištění rovnováhy mezi spotřebou a výrobou.

Mezi důležité podkategorie patří opět detekce poruch a bezpečnost komunikačního prostředí. Základní postup operace TVPP je následující: TVPP nejprve shromáždí technické parametry integrovaných zdrojů včetně statických a dynamických provozních dat. Zjištěné informace předá operátorovi a obdrží bezpečnostní regulační požadavky (např. meze toků výkonu).

Na základě těchto požadavků a ekonomického profilu CVPP provede TVPP bezpečnostní kontrolu a společně s CVPP případně vytvoří nutné modifikace. Jestliže nedostatky detekuje operátor, zajistí TVPP okamžitou nápravu a odložení provozu VPP, dokud není z hlediska bezpečnosti vše v pořádku. Při provozu sleduje TVPP stav všech zdrojů a zajišťuje optimální toky výkonů. Na konci daného cyklu vypočítá přesné výstupy všech zdrojů a předá je CVPP pro výpočet zisku.

Úložiště elektrické energie jsou nezbytnou součástí každé VPP, která využívá obnovitelné zdroje. Mezi hlavní cíle jejich funkce patří redukce fluktuací výkonu (např. u větrných elektráren), udržování napěťových hladin, stabilizace, „black start“, „load following“ a „peak shaving“. Existuje mnoho druhů úložišť, o kterých se uvažuje pro aplikaci ve VPP. Každý typ má své výhody a nevýhody, které jsou shrnuty na Obr. 23. Nejvyšší hustotu energie a zároveň nejnižší náklady na jednotku energie mají úložiště skladující stlačený vodík.

Zváží-li se i vysoká životnost, lze považovat vodíkové technologie za velmi perspektivní v oblasti skladování energie u VPP. Nevýhodou je však velmi nízká účinnost.

Alternativou jsou bateriové systémy, v dnešní době zejména Lithium-iontové akumulátory s vysokou energetickou hustotou i účinností, které ale nedosahují příznivých výsledků z hlediska nákladů a životnosti. Průtokové baterie (Vanadium Redox Flow Battery, Zinc Bromine Flow Battery) jsou téměř ve všech ohledech ještě horší.

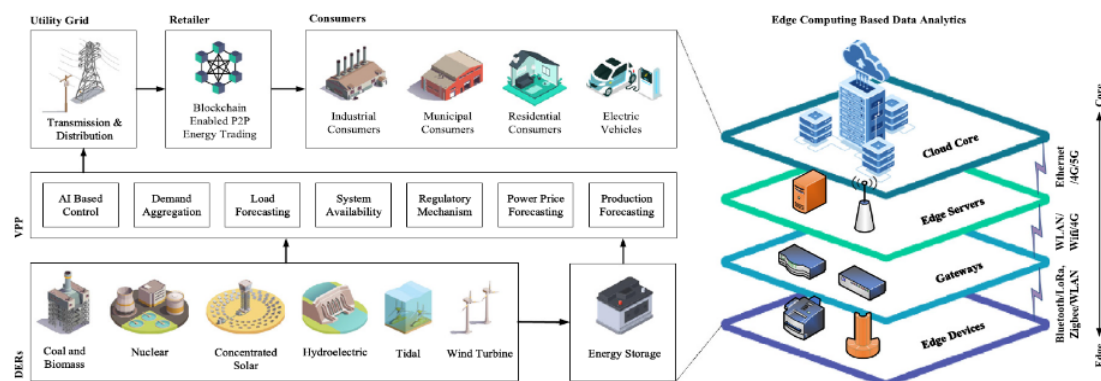
V případě požadavku dlouhé životnosti a nižších nákladů se nabízí možnost využití úložišť mechanické energie jako jsou PHS (Pumped hydro storage), CAES (Compressed Air Energy Storage). Ty ale strádají poměrně nízkou hustotou energie. FES (Flywheel Energy Storage), je na tom v tomto ohledu podstatně lépe, což se ale projevuje i v jeho vyšší ceně a o něco kratší životnosti. Zajímavé, ale v současnosti složité na implementaci jsou technologie SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage) a SCES (Superconducting Capacitor Energy Storage). Jedná se o jednoznačně nejdražší technologie, které ale nabízejí velmi vysokou účinnost, jelikož zde není potřeba konverze elektrické energie na jinou.

Type	Technology	Energy density (Wh/kg)	Life time (Years)	Efficiency (%)	Capital cost (\$/kWh)
Battery	Lead-acid	24-45	3-12	60-95	50-310
	Ni-Cd	50-150	15-20	60-70	400-2400
	NaS	150-240	5	75-90	180-500
	Li-ion	250-693	5-10	80-90	250-1000
Flow Battery	VRFB	15-25	10	70-85	175-1000
	ZBFB	15.7-39	>2000 (cycles)	75	200-600
Mechanical	PHS	0.2-2	30-50	70-85	8-100
	CAES	2-6	30	64-80	2-100
	FES	30-100	20	90	400-800
Electrical	SMES	<11.11	30	95	4000(kW)
	SCES	0.1-5	10-15	85-98	10,000
Chemical	HES	1250 (at 69 bar)	34	30-60	0.494-0.626

Obr. 23- Charakteristiky úložišť energie [21]

Jedním z nejdůležitějších prvků VPP jsou „chytré“ střídače (Smart Inverters, SI). Původně byl tento název používán pro střídače u fotovoltaických systémů s nadstandardními funkcemi (např. kompenzace jalového výkonu). Dnes jsou takto označovány střídače u všech decentralizovaných zdrojů s komunikačními a pokročilými řídicími funkcemi. V základu se tyto funkce dělí podle toho, kdo je vykonává a jaký je jejich účel.

V případě VPP se převážně uvažuje o počítačových sítích založených na cloud computingu, tudíž zpracování a ukládání dat a komunikace probíhá přes servery, které jsou součástí VPP. Cloudové počítače tedy fungují jako zákazník flexibilní zákazník VPP, který může v případě potřeby autonomně řídit svou spotřebu. Nevýhodou této technologie je složitý chod sítě vzhledem k obrovskému množství dat a samozřejmě i bezpečnostní nedostatky. Možným řešením je implementace edge computingu, která umožní data zpracovat alespoň částečně hned u zdroje, přímou komunikaci mezi prvky sítě a krátkodobé ukládání dat. Implementace této technologie je ovšem podstatně složitější a nákladnější. Předpokládaná infrastruktura VPP využívající edge computing je na Obr. 24.



Obr. 24- Předpokládaná infrastruktura budoucí VPP

VPP není novým konceptem, poprvé přišel s nápadem virtuální elektrárny Shimon Awerbuch již v roce 1997. V dnešní době však VPP nabývají čím dál více na důležitosti. V roce 2019 bylo odhadnuto, že trh s VPP bude v letech 2020 až 2027 zvyšovat svou hodnotu o 21,3 % ročně. Nejvýznamnější projekty virtuálních elektráren jsou shrnuty v Tabulce 5.

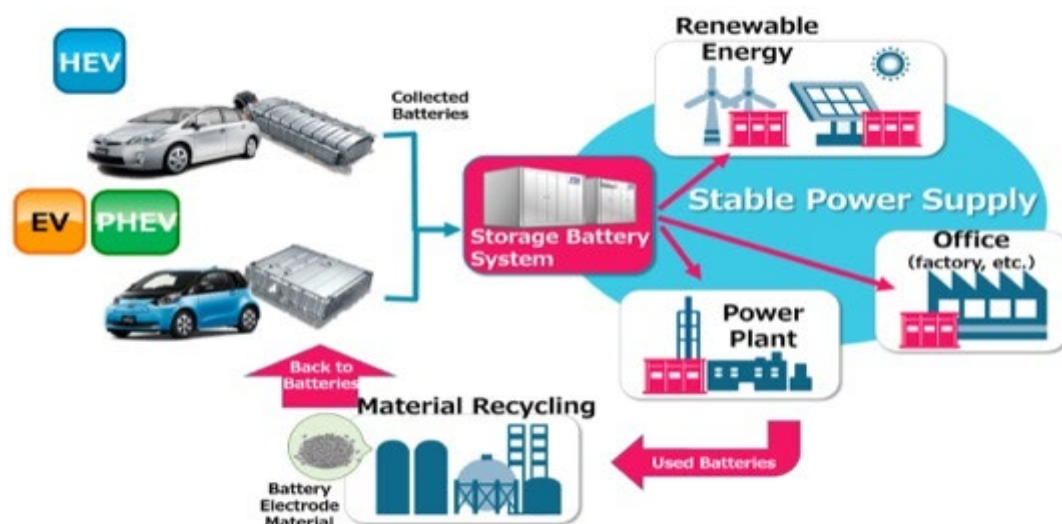
Název	Začátek	Země	Typy DERs	Počet DERs	Počet zákazníků	Výkon
FENIX	2005	Anglie, Španělsko, Francie	Malé kogenerační jednotky, FV, větrné el.	100-1000000	169000	1234 MVA
EDISON	2011	Dánsko	Elektromobily	52	27000	125 MW
WEB2ENERGY	2009	Německo, Polsko	Kogenerace, FV, větrné, bioplyn, vodní el.	16	200	40,5 MW
SA VPP	2017	Austrálie	FV, baterie	1000	50000	250 MW
CON EDISON	2016	USA	FV, baterie	1000	30	100-300 MW

Tabulka 5- Seznam nejvýznamnějších projektů VPP [21]

2.3.4 Budoucí technologická podoba bateriového uložení

Bateriová uložení hrají klíčovou roli v oblasti obnovitelné energie, elektromobilů a dalších aplikacích. Lze tedy očekávat jejich vývoj spjatý s jejich větším využitím v budoucnosti³²³³.

1. **Zvýšená kapacita a účinnost** – inovace v oblasti bateriového designu a materiálů umožní vytvářet baterie s vyšší kapacitou a účinností. To povede k delšímu životu baterií a většímu množství energie, které mohou uchovávat.
2. **Snížení nákladů** – s rostoucí poptávkou po bateriových uloženích se očekává, že jejich náklady budou klesat. To by mohlo umožnit širšímu spektru lidí a průmyslovým odvětvím využívat tuto technologii. Hovoří se o poklesu cen velkých bateriových uložení v USA o 70 % za 3 roky³⁴.
3. **Nové technologie** – výzkum nových technologií, jako jsou pevné elektrolyty, lithium-síra atd., může přinést vylepšení v oblasti energetické hustoty, zabezpečení a životnosti baterií.
4. **Druhá životnost baterie** – využívání baterií „druhé šance“ může pomoci snížit enviromentální dopad baterií a prodloužit jejich životnost. Baterie, které již nejsou dostatečně účinné pro elektromobily, mohou stále sloužit v energetických uloženích.



Obr. 25 - Možné využití baterie "druhé šance" (Toyota) [14]

5. **Integrace s OZE** – bateriové systémy budou stále důležitější pro uchování a distribuci energie. To umožní lepší řízení energetických sítí a snížení závislosti na fosilních palivech.
6. **Větší mobilita** – baterie budou pokračovat ve zlepšování v oblasti hustoty energie, což umožní vývoj lehčích a výkonnějších elektromobilů a uložení.
7. **Síťová integrace** – uložení budou více integrována do energetických sítí a budou sloužit k vyrovnání zátěže a zajišťování spolehlivosti dodávek energie.

³² [14] ENERGIEBEZEMISI. Trendy v obnovitelných zdrojích 2022: recyklace, ukládání a infrastruktura. Online. 2022. Dostupné z: <https://energiebezemisi.cz/novinky-v-oboru/trendy-oze-2022/>. [cit. 2023-10-12].

³³ [52] VĚDAVÝZKUM.CZ. Klíčem k energetické nezávislosti není jádro, ale obnovitelné zdroje a inovace. Online. 2023. Dostupné z: <https://vedavyzkum.cz/z-domova/z-domova/klicem-k-energeticke-nezavislosti-neni-jadro-ale-obnovitelne-zdroje-a-inovace>. [cit. 2023-10-12].

³⁴ [34] MAJLING, Eduard. Ceny velkých bateriových uložení v USA poklesly za 3 roky o 70 %. Online. In: OEnergetice.cz. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/akumulace-energie/ceny-velkych-bateriovych-ulozist-usa-poklesly-za-3-roky-70>. [cit. 2023-10-12].

8. **Ekologická udržitelnost** – výroba baterií a nakládání s nimi bude stále více klást důraz na udržitelnost a snižování enviromentálního dopadu.
9. **Inovace a bezpečnost** – bezpečnost baterií zůstane klíčovým faktorem, a proto se očekává, že budou vyvíjeny nové technologie a postupy pro minimalizaci rizika požárů a jiných incidentů.

2.3.5 Ekologie a likvidace

Problémy spojené s ekologií a recyklací jsou důležité, protože baterie obsahují různé škodlivé látky (rtuť, kadmium, olovo, lithium, mangan), které mohou mít negativní dopad na životní prostředí, pokud nejsou zpracovány správným způsobem. Lithium-iontové baterie, které jsou běžně používány v mobilních telefonech, elektromobilech, mohou být náchylné k přehřátí a požárům, což ztěžuje jejich bezpečnou recyklaci. Současně i nedostatek specializované infrastruktury a technologie způsobuje nevhodnou likvidaci baterií, což vede k enviromentálnímu znečištění. Díky speciálním požadavkům na recyklaci je tento proces cenově náročný, což vede k tomu, že v mnoha částech světa je míra recyklace baterií velmi nízká.

Evropská unie přijala 14. června 2023 nová pravidla pro výrobu a recyklaci baterií, která posilují pravidla udržitelnosti pro baterie v celé fázi cyklu jejich využívání – od získání drahých kovů až po jejich recyklaci. Tato legislativa má za cíl minimalizovat dopad na životní prostředí a podpořit konkurenceschopnost evropského průmyslu. Jelikož celosvětová poptávka po bateriích se do roku 2030 zvýší 14krát a EU by díky recyklaci mohla pokrýt 17 % této poptávky³⁵ (přičemž množství baterií, které přichází do EU je přibližně 800 000 tun v rámci automobilového průmyslu, 190 000 tun v rámci průmyslu a 160 000 tun v rámci spotřebitelského trhu). Podle nových pravidel by se měla omezit těžba surových surovin ve prospěch použití recyklovaného materiálu z již vyřazených baterií, což znamená opatřit baterie ekologickými značkami, které budou odrážet jejich uhlíkovou stopu. Například nařízení stanovuje využití lithia z vysloužilých baterií ve výši 50 % do konce roku 2027 a 80 % do konce roku 2031. Navíc povinná minimální úroveň recyklovaného obsahu v baterii je stanovena na 16 % rec. kobaltu, 85 % rec. olova, 6 % rec. lithia a 6 % rec. niklu³⁶.

V České republice existuje kolektivní systém pro zpětný odběr baterií a akumulátorů, který získal oprávnění k provozování³⁷.

Materiály obsažené v li-ion bateriích (které jsou nejhojněji využívané) se liší v závislosti na aktivním materiálu katody. Na současném trhu dominují malé baterie, které využívají katody z kobaltu, ale objevují se i katody s manganem a fosforečnanem železa.

V následující tabulce je souhrn materiálů obsažených v li-ion bateriích, které byly odděleny v procesu demontáže u baterií pro hybridní vozy (u elektromobilů je relativní četnost bateriového článku 60 %)³⁸.

³⁵ [17] EVROPSKÝ PARLAMENT. Nová pravidla EU pro udržitelnější a etické baterie. Online. 2023. Dostupné z: <https://www.europarl.europa.eu/news/cs/headlines/economy/20220228STO24218/nova-pravidla-eu-pro-udrzitelnejsi-a-eticke-baterie>. [cit. 2023-10-12].

³⁶ [1] AKU-BAT CZ. EU zavádí nová pravidla pro výrobu a recyklaci baterií: Cílem je soběstačnost, udržitelnost a podpora konkurenceschopnosti. Online. In: TZB-INFO. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektriny/25630-eu-zavadi-nova-pravidla-pro-vyrodu-a-recyklaci-baterii>. [cit. 2023-10-12].

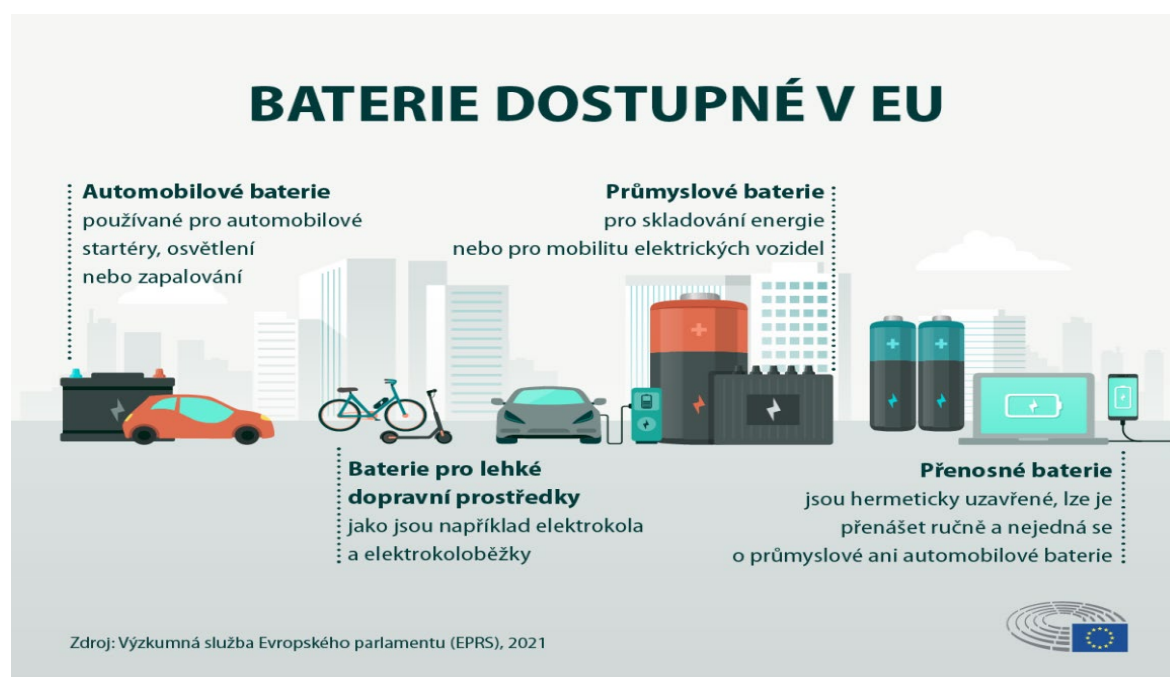
³⁷ [56] VRÁNKOVÁ, Kateřina. ECOBAT získal oprávnění k provozování kolektivního systému. Nově nabízí řešení pro průmyslové a startovací baterie. Online. In: ECOBAT.cz. Dostupné z: <https://www.ecobat.cz/2022/12/21/ecobat-ziskal-opravneni-k-provozovani-kolektivniho-systemu/>. [cit. 2023-10-12].

³⁸ [58] VYTLAČIL, Petr. Recyklace li-ion baterií – úvod. Online. In: OEnergetice.cz. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/akumulace-energie/recyklace-lithium-ion-baterii-uvod>. [cit. 2023-10-12].

Materiál/komponenty	Hmotnost (kg)	Relativní četnost (%)
Bateriové články	80,0	32,0
Ocel (nerezová ocel,...)	75,0	30,0
Plast	26,0	10,4
Hliník	21,0	8,4
Měď	7,0	2,8
Elektronické komponenty	2,3	0,92
Elastomer	3,6	1,44
Kompozitní materiály	35,1	14,04
Celkem	250	100

Tabulka 6- Souhrn materiálů obsažených v Li-ion bateriích u prototypních baterií (hybridní vozy) [58]

Při recyklaci je nejprve odstraněn obal, což usnadní recyklování ocele, hliníku, plastu a elektroniky. Po tomto kroku následuje demontáž bateriového článku. Existují dvě metody, jak lze demontáž provést – pyrometalurgická recyklace (využívána v komerčním měřítku za tepelného a elektrického procesu, lze získat kobalt, nikl, měď), hydrometalurgická recyklace (v prototypním měřítku, při použití drtiče a solného roztoku, lze získat měď, hliník, kobalt, Li_2CO_3).



Obr. 26- Obecný přehled baterií, které jsou dostupné v EU [58]

2.4 Bateriové systémy ve spojení s vodní elektrárnou

Bateriové systémy v kombinaci s vodními elektrárnami mohou hrát klíčovou roli při optimalizaci výroby elektřiny, skladování energie a zlepšení spolehlivosti elektrického systému. Tato kombinace může nabídnout několik výhod³⁹:

1. **Vyvažování nabídky a poptávky:** Bateriové systémy mohou skladovat nadbytečnou elektřinu vyrobenou vodní elektrárnou v době, kdy je poptávka nízká a uvolňovat ji zpět do sítě v době špičkové poptávky. Tím lze vyvažovat kolísavou výrobu elektřiny a maximalizovat využití energie.
2. **Spolehlivost dodávek elektřiny:** Bateriové systémy mohou fungovat jako záložní zdroje elektřiny v případě, že vodní elektrárna přestane produkovat energii z důvodu nedostatku vody nebo údržby. Tím se zvyšuje spolehlivost dodávek elektřiny.
3. **Rychlá reakce na poptávku:** Bateriové systémy mohou rychle reagovat na změny v poptávce po elektřině. To je užitečné při vyrovnávání krátkodobých výkyvů v síti, jako jsou špičky v poptávce.
4. **Nouzové situace:** Bateriové systémy mohou být využity v nouzových situacích, jako je blackout nebo poruchy v elektrické síti, k udržení kritických zařízení a služeb v provozu.
5. **Snížení nákladů na přenosovou infrastrukturu:** Skladování energie bateriemi může snížit potřebu výstavby nových přenosových linek a infrastruktury pro přenos elektřiny z vodní elektrárny na vzdálená místa.
6. **Flexibilita:** Bateriové systémy jsou flexibilní a mohou být použity v různých typech vodních elektráren, včetně průtočných a přečerpávacích elektráren.

2.4.1 Legislativa

V České republice je legislativa ohledně bateriových uložišť stále poměrně omezená a brzdí tak rozvoj těchto uložišť. Současný energetický zákon⁴⁰ nezná pojmy jako akumulace energie, uložště elektrické energie nebo jejich ekvivalent, což ztěžuje jejich stavbu. V červenci 2021 Sněmovna odmítla návrh, který by umožnil akumulaci bez provozní podpory. V současné době tak žádná baterie v Česku nemůže fungovat jako klasická baterie, která se nabíjí a vybíjí do sítě, ale tak jako vyrovnávací doplněk energetického zdroje u elektrárny. V roce 2020 byl předložen pozměňovací návrh k energetickému zákonu, který by umožnil získávat energetickým uložišťům licenci k podnikání v energetice, ale bohužel se také nesetkal se schválením⁴¹. Pro nasazení bateriových systémů v ČR je nutné přijmout předpoklady pro jejich rozvoj a začlenění do legislativy. Jedná se o tyto kroky:

- začlenění pojmů souvisejících s akumulací elektřiny do Energetického zákona,
- stanovení kategorie, do které by akumulární systém spadal,
- začlenění systémů akumulace pro poskytování PpS do Kodexu PS,
- stanovení ceny (sankcí) pro akumulární systémy poskytující PpS,
- vymezení vztahu bateriového systému připojeného do ES – zda se při odběru energie jedná o regulační energii nebo o odběratele,

³⁹ [3] BOYLE, Godfrey. *Renewable Energy: Power for a Sustainable Future*. 3. Londýn: Oxford University Press, 2012. ISBN 978-0199545339.

⁴⁰ [63] Zákon 458/2000 Sb. O podmínkách podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích a o změně některých zákonů (energetický zákon), ve znění pozdějších předpisů. In: Sbíрка zákonů. Praha.

⁴¹ [61] ZENKNER, Petr. Rozvoj bateriových uložišť brzdí zákony.: Nejsou ani peníze z Modernizačního fondu. Online. In: *Hospodářské noviny*. S. 1. Dostupné z: <https://archiv.hn.cz/c1-66970550-rozvoj-bateriovych-ulozist-brzdi-zakony-nejsou-ani-penize-z-modernizacniho-fondu>. [cit. 2023-10-02].

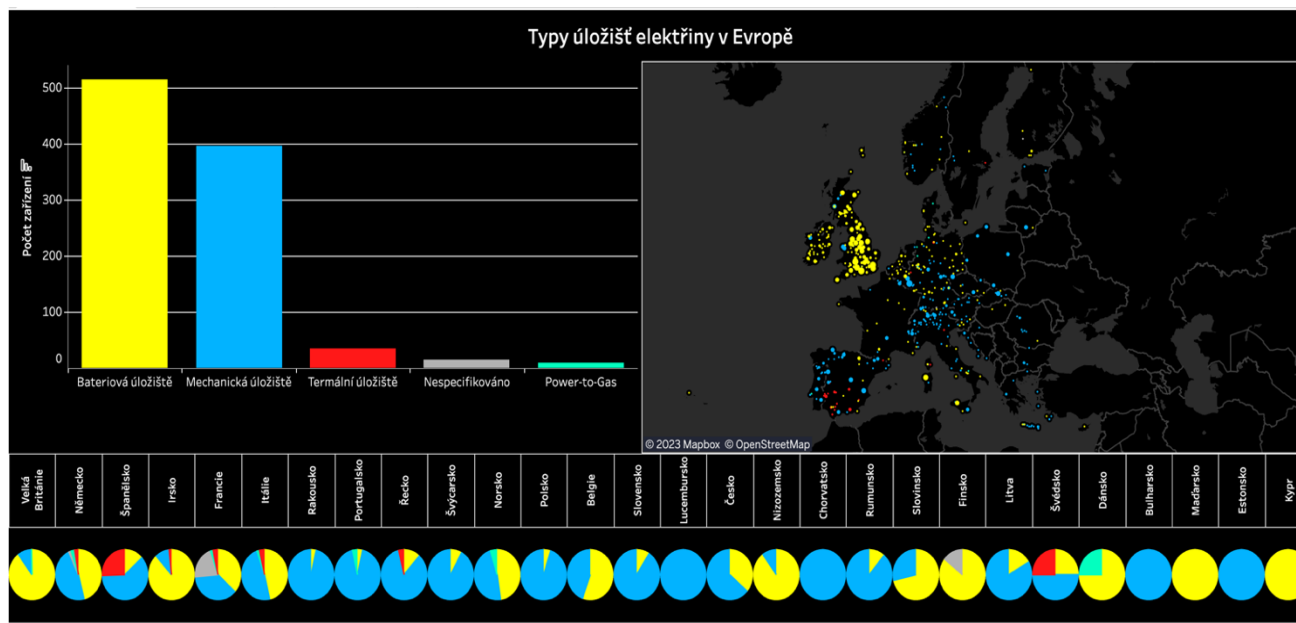
- stanovit, zda by bateriový systém podléhal platbě za rezervovanou kapacitu na celou velikost záporné regulační křivky, nebo pouze na pokrytí vlastní spotřeby⁴².

I přes tuto legislativní překážku se v České republice podařilo vystavět několik velkokapacitních bateriových uložišť, která slouží k ukládání energie a vyrovnávání energetických špiček.

Jedná se konkrétně o tato uložišť⁴³:

1. uložišť Sokolovské uhelné na Sokolovsku s kapacitou 7,45 MWh,
2. uložišť v Mělníku s kapacitou 22 MWh,
3. uložišť ve Vítkovcích s výkonem 10 MW,
4. firemní uložišť od AERS s kapacitou 2,95 MWh,
5. uložišť Mýdlovary (E.ON) s celkovou kapacitou 1,8 MWh,
6. uložišť Tušimice (ČEZ, a.s.) s výkonem 4 MW a kapacitou 2,8 MWh, které slouží k ukládání energie a testování různých režimů poskytování podpůrných služeb.

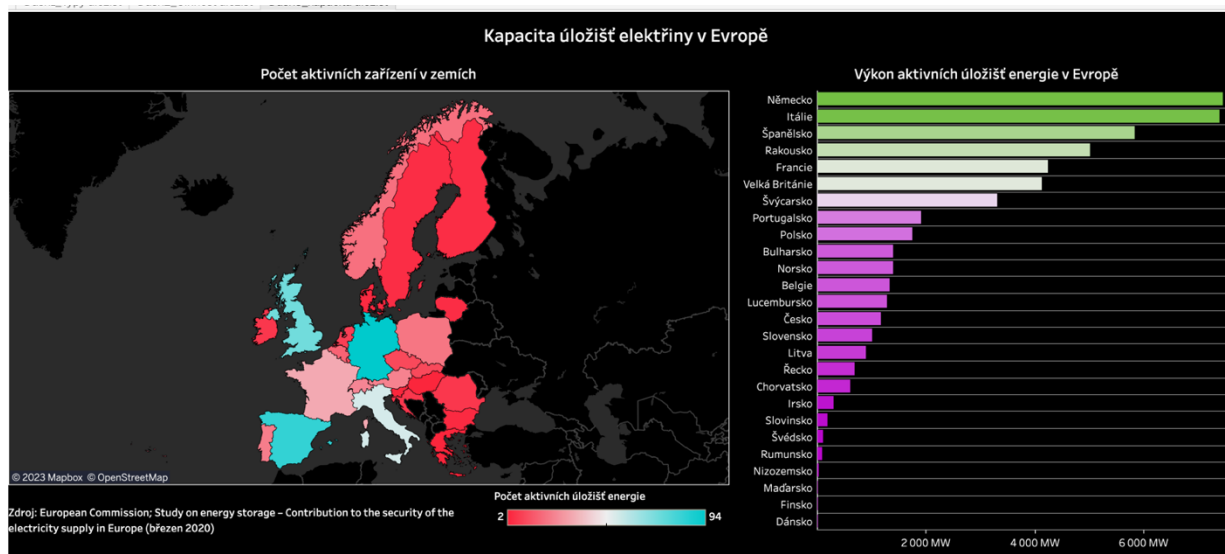
Je třeba poznamenat, že v Česku je počet velkokapacitních bateriových uložišť stále poměrně nízký v porovnání s jinými evropskými zeměmi (viz grafy níže, Obr. 27. Obr. 28).



Obr. 27- Typy uložišť elektřiny v Evropě [61]

⁴² [19] HAVLÍK, Daniel. Využití bateriových systémů pro poskytování Podpůrných služeb. Online, Diplomová. Praha: ČVUT FEL. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/68479/F3-DP-2017-Havlik-Daniel-Diplomova%20prace_Daniel%20Havlik.pdf?isAllowed=y&sequence=1. [cit. 2023-10-18]. Str. 36

⁴³ [61] ZENKNER, Petr. Rozvoj bateriových uložišť brzdí zákony.: Nejsou ani peníze z Modernizačního fondu. Online. In: *Hospodářské noviny*. S. 1. Dostupné z: <https://archiv.hn.cz/c1-66970550-rozvoj-bateriovych-ulozist-brzdi-zakony-nejsou-ani-penize-z-modernizacniho-fondu>. [cit. 2023-10-02].



Jak je patrné z grafů výše, nejvíce bateriových úložišť vzniká ve Velké Británii, celkem tam je v provozu nebo se připravuje 260 úložišť. Mezi členskými zeměmi EU je na prvním místě Německo se 115 zařízeními nebo projekty. Němci vedou i ve velikosti instalovaného výkonu, který dosahuje 7,5 GW, což odpovídá zhruba třetině instalovaného výkonu všech elektráren v Česku.

I přes to, že lze pozorovat bateriový boom, je stále 90 % instalovaného výkonu velkých úložišť v Evropě tvořeno přečerpávacími vodními elektrárnami.

V Česku najdeme čtyři, přičemž nejvýkonnější z nich jsou Dlouhé stráně (které umí poskytnout službu „start ze tmy“ a v případě blackoutu nastartovat elektrárnu Chvaletice) a Dalešice (která je obdobně propojena s jadernou elektrárnou Dukovany).

Jelikož se jedná o propojení vodní elektrárny a bateriového úložiště, je dobré zmínit také legislativu, která se týká právě vodních elektráren. Z nejdůležitějších lze zmínit níže vyčtené body.

1. **Vodní zákon (č. 254/2001 Sb.)**⁴⁴, který stanovuje obecná pravidla pro využívání vodních zdrojů, včetně staveb na vodních tocích, jako jsou vodní elektrárny. Zákon obsahuje ustanovení týkající se povolení pro výstavbu a provoz vodních elektráren, ochrany vodního prostředí a ochrany před povodněmi.
2. **Zákon o energetických zdrojích (č. 165/2012 Sb.)**⁴⁵, který stanovuje obecná pravidla pro výrobu elektřiny a tepla. Obsahuje ustanovení týkající se podpory obnovitelných zdrojů energie.
3. **Nařízení vlády č. 189/2022 Sb.**⁴⁶, toto nařízení stanovuje pravidla pro podporu výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů energie včetně vodní energie. Nařízení upravuje podmínky pro získání podpory a povinnosti vlastníků vodních elektráren.
4. **Nařízení Energetického regulačního úřadu.** ERÚ vydává nařízení a rozhodnutí týkající se cen elektřiny, tarifů a podmínek pro připojení k distribuční síti, což může ovlivnit ekonomiku vodních elektráren.

⁴⁴ [62] Zákon č. 254/2001 Sb. o vodách a o změně některých zákonů (vodní zákon), ve znění pozdějších předpisů. In: *Sbírka zákonů*. 2001.

⁴⁵ [63] Zákon 458/2000 Sb. o podmínkách podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích a o změně některých zákonů (energetický zákon), ve znění pozdějších předpisů. In: *Sbírka zákonů*. Praha.

⁴⁶ [38] Nařízení vlády č. 189/2022 Sb.: Nařízení vlády o vymezení rozvoje podporovaných zdrojů energie, ve znění pozdějších předpisů. In: *Sbírka zákonů*. 2022.

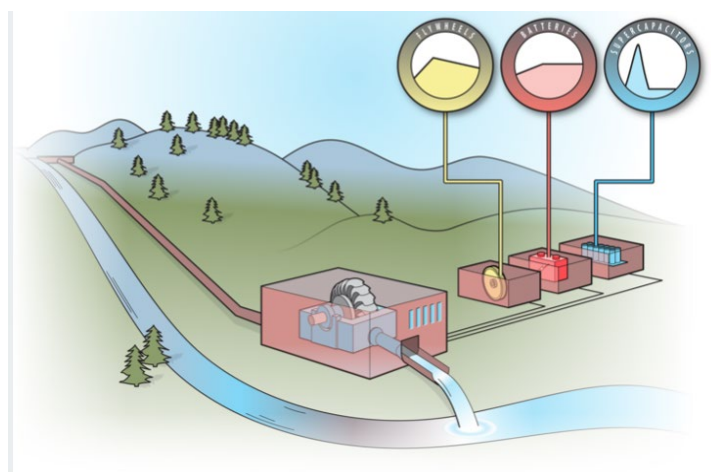
5. **Nařízení a směrnice Evropské unie.** Česká republika je členem EU, a proto musí dodržovat evropské právní předpisy týkající se energetiky a životního prostředí, které mohou mít dopad na vodní elektrárny.
6. V České republice existuje norma ČSN 75 2601⁴⁷, která se týká navrhování, výstavby, rekonstrukce a provozu malých vodních elektráren o celkovém instalovaném výkonu do 10 000 kW. Pro větší vodní elektrárny neexistuje specifická norma, ale platí obecné požadavky na bezpečnost a ochranu životního prostředí (ČSN EN ISO 9001:2016 – Systém managementu jakosti, ČSN EN ISO 14001:2016 – Systém managementu životního prostředí).

2.4.2 Způsoby implementace akumulace do vodní elektrárny

Existují různé způsoby, jak implementovat akumulací systém do provozu vodní elektrárny. Nám nejznámější je pravděpodobně využití horní nádrže v přečerpávacích vodních elektrárnách. Lze však nalézt i jiné možnosti využití akumulace. V zásadě je možné zmínit tři další provedení. Jedním z nich je samostatné bateriové uložení, které je propojeno s vodní elektrárnou pro zajištění stabilního a spolehlivého zdroje energie. Dále vodíkové uložení, které je stále ve fázi výzkumu, ale dle prognóz by od roku 2050 mělo být díky své ekologičnosti dominantně využívanou technologií. V poslední řadě lze zmínit kombinaci průtočných vodních elektráren a baterií, jako alternativa k přečerpávacím elektrárnám⁴⁸.

Tato kombinace se momentálně testuje v USA. Jedná se o projekt podporovaný americkou vládou, který zkoumá způsoby využití průtočných vodních elektráren kombinovaných se systémem akumulace, který vytváří virtuální nádrž.

Jako akumulací zařízení jsou využívány baterie (které mohou dodávat výkon po dobu několika hodin), setrvačníky a superkapacitory (které jsou vhodné pro poskytování výkonu po dobu několika minut), viz Obr. 29. Jeden z testů v projektu ukázal, že díky akumulací jednotce se výnosnost průtočné vodní elektrárny zvýšila o 12 %–16 % díky dodatečným službám, které elektrárna může poskytnout pro elektrizační soustavu.



Obr. 29- Průtočná vodní elektrárna s akumulací [57]

⁴⁷ [11] ČSN 75 2601, *Malé vodní elektrárny - Základní požadavky*. 11/2010. Praha, 2010.

⁴⁸ [57] VYTLAČIL, Petr. Kombinace vodních elektráren a baterií jako alternativa přečerpávacích elektráren? Tuto alternativu ověřují v USA. Online. In: oEnergetice. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/akumulace-energie/kombinace-vodnich-elektren-baterii-jako-alternativa-precerpavacich-elektren-tuto-alternativu-overuji-usa>. [cit. 2023-10-03].

2.5 Vodní elektrárna Štěchovice

Vodní dílo Štěchovice se nachází na řece Vltavě na 84, 318. říčním kilometru, jedná se o jednu z částí tzv. Vltavské kaskády. Historie výstavby je velmi dlouhá a poznamenaná II. světovou válkou. Stavba byla zadána v roce 1937, zkušební provoz středotlaké turbíny měl být následně zahájen v roce 1941, válečné poměry však způsobily zpomalení prací a první turbína byla uvedena do provozu až v roce 1943. Do plného provozu byla Štěchovická přehrada s hydrocentrálou uvedena až v roce 1945.

Stavba má tři části – těleso přehrady, plavební komoru a středotlakou elektrárnu. K těmto částem byla přiřčena během stavby ještě elektrárna vysokotlaká. Teprve během výstavby bylo rozhodnuto o vybudování přečerpávací elektrárny.

Ve Štěchovicích byla příznivá konfigurace pro její provoz (a to díky vysoké stráni s dostatečně velkým prostorem na hřebeni Homole pro akumulaci nádrží). Strojovna přečerpávací elektrárny Štěchovice II je s nádrží spojena dvěma přivaděči o celkové délce 590 m a průměru od 1,7 do 2,0 m. Elektrárna prošla v letech 1992–1995 zásadní rekonstrukcí. Dnes slouží zejména k vyrovnání špičkových odtoků z vodních elektráren Slapy a Orlická a jejich následnému energetickému využití⁴⁹.

Hydrologické údaje a technické parametry elektráren Štěchovice I (jejíž součástí je i venkovní rozvodna 110 kV a vývodové a distribuční transformátory), Štěchovice II jsou uvedeny v tabulce níže, viz Tabulka 7⁵⁰.



Obr. 30- Lokalita [55]

⁴⁹ [55] *Vodní elektrárny Štěchovice*. Online. SKUPINA ČEZ. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobní-zdroje/obnovitelné-zdroje/voda/vodní-elektrárny/ceska-republika/stechovice-58100>. [cit. 2023-10-03].

⁵⁰[53] *VD Štěchovice*. Online. In: PVL.cz. Dostupné z: <https://www.pvl.cz/files/download/vodohospodarske-informace/vodni-dila-a-nadrze/stechovice.pdf>. [cit. 2023-10-03].

Hydrologické údaje	
Plocha povodí	13 298,3 km ²
Průměrný dlouhodobý roční průtok Q_a	85,6 m ³ /s
N – letý průtok Q_{100}	2 250, 0 m ³ /s
Celkový objem nádrže	10,4 mil. m ³
Zatopená plocha	95,7 ha
Výška hráze nade dnem	22 m
Délka hráze	124 m
Středotlaká elektrárna – Štěchovice I	
Typ turbíny	Kaplan
Počet soustrojí	2
Instalovaný výkon	22,5 MW
Maximální hltnost	2 x 80 m ³ /s
Rozsah spádu	14,5-20,1 m
Vysokotlaká elektrárna – Štěchovice II	
Typ turbíny	Francis (reverzní) – FR 180
Počet soustrojí	1
Instalovaný výkon	45 MW
Maximální hltnost	27 m ³ /s
Rozsah spádu	209,8 – 219,5 m
Objem akumulární nádrže	500 tis. m ³

Tabulka 7- Parametry VD Štěchovice



Obr. 32 – Štěchovická přehrada [55]



Obr. 31 – Letecký pohled na elektrárnu Štěchovice II [55]

3 Praktický návrh bateriového systému ve Štěchovicích

Jedná se o konkrétní projekt realizovaný na území ČR, proto v rámci ochrany identity vlastníka a provozovatele (ČEZ a.s.), nebudou uvedeny celé výkresy a všechny informace.

3.1 Průběh návrhu bateriového systému k vodní elektrárně

Návrh bateriového systému k vodní elektrárně je komplexní proces, který zahrnuje několik důležitých kroků. V seznamu níže je obecně shrnut průběh tohoto procesu⁵¹⁵².

1. **Identifikace potřeby uložení** – prvním krokem je identifikace potřeby pro bateriové uložení. To zahrnuje analýzu energetických požadavků vodní elektrárny a zjištění, proč by bylo výhodné mít uložení pro uchování vyrobené elektřiny.
2. **Analýza dat** – provádí se podrobná analýza dat týkajících se výroby elektřiny vodní elektrárnou a spotřeby. To pomáhá určit optimální velikost a kapacitu bateriového uložení.
3. **Výběr technologie baterií** – na základě potřeb vodní elektrárny se vybírá vhodná technologie baterií. Může se jednat o lithium – iontové baterie, olovené akumulátory, či jiné technologie v závislosti na specifických požadavcích a podmínkách.
4. **Návrh kapacity** – stanoví se kapacita bateriového uložení, která bude schopna uchovat dostatečné množství elektřiny pro pokrytí špičkové spotřeby, pro vyrovnání kolísání výroby elektřiny vodní elektrárnou nebo pro pokrytí vlastní spotřeby elektrárny.
5. **Návrh zapojení** – navrhne se, jak bateriové uložení bude zapojeno do existujícího energetického systému vodní elektrárny. To zahrnuje připojení a řízení nabíjecího a vybíjecího procesu.
6. **Finanční analýza** – provede se finanční analýza, která zahrnuje náklady na nákup a instalaci bateriového uložení, provozní náklady a očekávané úspory nebo příjmy z provozu.
7. **Regulační a environmentální shody** – zajistí se, že návrh bateriového uložení splňuje veškeré regulační požadavky a environmentální normy.
8. **Instalace a testování** – po schválení návrhu probíhá instalace bateriového uložení a jeho důkladné testování, aby se zajistilo, že funguje správně a splňuje požadavky.
9. **Monitorování a údržba** – po instalaci je důležité pravidelné monitorování provozu a provádět rutinní údržbu, aby se zajistila jeho dlouhodobá spolehlivost.
10. **Optimalizace provozu** – bateriové uložení lze optimalizovat pro efektivní využití elektřiny, například pro vyrovnání špičkové spotřeby, podporu stabilní dodávky elektřiny a snížení nákladů na elektřinu.

3.2 Identifikace potřeby uložení

Zde se nabízí několik možností, jak baterie v elektrárně využít. Prvním využitím baterie je připojení ke středotlaké elektrárně za účelem akumulace energie pro pokrytí vlastní spotřeby, případně i pro zajištění dodávek energie do Dispečerského centra v přílehlé budově.

Další možností je využití baterie pro systémové služby (konkrétněji služby výkonové rovnováhy, SVR), které jsou definovány ve druhé části Kodexu Přenosové soustavy

⁵¹ [6] CIGLER, Jiří. MICROPT DESIGN: Optimální dimenzování hybridních energetických systémů s bateriovým úložištěm. Online. In: *Tzb-info.cz*. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektriny/19222-micropt-design-optimalni-dimenzovani-hybridnich-energetickych-systemu-s-bateriovym-ulozistem>. [cit. 2023-10-03].

⁵² [57] VYTLAČIL, Petr. Kombinace vodních elektráren a baterií jako alternativa přečerpávacích elektráren? Tuto alternativu ověřují v USA. Online. In: . Dostupné z: <https://oenergetice.cz/akumulace-energie/kombinace-vodnich-elektraren-baterii-jako-alternativa-precerpavacich-elektraren-tuto-alternativu-overuji-usa>. [cit. 2023-10-03].

společnosti ČEPS. Pro tuto možnost jsou v elektrárně ideální podmínky z pohledu připojení k distribuční soustavě 110 kV. Navíc lze využít výhody baterie oproti přečerpávací vodní elektrárně, zejména krátká doba najetí zdroje (baterie jsou schopny najet v řádu desítek sekund, zatímco PVE v řádu několika minut). Dále dle Kapitoly 2.4.2 se výnosnost elektrárny může díky dodatečným službám elektrizační soustavě zvýšit o 12 %-16 %. V této možnosti je baterie nabíjena jak ze sítě, tak energií vyrobenou v elektrárně. V případě, kdy elektrárna vyrábí, ale není možnost dodávat do sítě (hlavní činností VE Štěchovice je akumulace a vyrovnávání hladin ve Vltavské kaskádě, pokud by tedy bylo nutno pouštět vodu přes hráz, i přes to, že v síti není potřeba, není vyrobená energie nikterak využita), energie by byla ukládána do baterie.

3.2.1 Podmínky pro poskytování SVR⁵³

Poskytovatel musí v závislosti na typu poskytované podpůrné služby mít před zahájením nabízení PpS:

- Poskytovatel musí mít uzavřenou platnou a účinnou Dohodu o podmínkách nákupu a poskytování služeb výkonové rovnováhy (Dohoda SVR) nebo musí mít uzavřenou platnou a účinnou smlouvu o poskytování ostatních PpS.
- Poskytovatel musí vlastnit platný Certifikát pro poskytování PpS v obchodním portálu.
- Poskytovatel musí vlastnit stanovisko provozovatele distribuční soustavy (PDS), do jehož distribuční soustavy je Poskytovatel přímo připojen např. ve formě uzavřené Smlouvy o umožnění využití předávacího místa k poskytování SVR pro ČEPS, kterou uzavírají majitel předávacího místa a PDS obsahující souhlas majitele předávacího místa, který je majitelem výroby elektřiny, nebo odběrného elektrického zařízení, jejichž prostřednictvím je k distribuční soustavě PDS připojeno energetické zařízení Poskytovatele s rezervovaným výkonem/příkonem 100 kW a více, z kterého jsou poskytovány SVR.
- Poskytovatel musí předložit PDS schválený certifikát včetně čísla souvisejícího stanoviska PDS, např. ve formě uzavřené Smlouvy o možnostech a podmínkách vyvedení činného výkonu pro poskytování SVR pro ČEPS prostřednictvím DS nebo Rámcové smlouvy o možnostech a podmínkách vyvedení činného výkonu pro poskytování SVR pro ČEPS prostřednictvím DS.
- Poskytovatel musí disponovat a užívat elektronický podpis a certifikáty pro elektronickou komunikaci.
- Poskytovatel musí vlastnit připojení do SDŘS a „Protokol o úspěšném provedení zkoušek bod-bod a funkčních testů“.
- Poskytovatelé provozující energetická zařízení, která jsou vyvedena do distribuční soustavy a přenosové soustavy, jsou povinni v souladu s PDS zohlednit plánované odstávky vedení a omezení distribuce elektřiny zařízení připojených do distribuční soustavy. Dále je Poskytovatel provozovat všechna svá energetická zařízení na takové výkonové hladině, aby byl schopen zajistit všechny obchodně sjednané PpS.

Všechny PpS musí splňovat tyto obecné požadavky:

1. měřitelnost,
2. garantovaná dostupnost služby s možností vyžádat si inspekci,
3. certifikovatelnost,
4. možnost průběžné kontroly poskytování PpS,
5. v případě poskytování SRUQ se jedná o zařízení připojená do PS.

⁵³ [9] ČEPS a.s., „KODEX PŘENOSOVÉ SOUSTAVY Část 2. Podpůrné služby (PpS)“, s. 214, 2016. [cit. 2023-10-18]

Jednotky poskytující SVR musí být vybaveny systémem EVS, který sestává ze dvou částí – povinné a dobrovolné. Povinná část obsahuje signál „Aktivace RE mimo MOL“ pomocí kterého jsou Poskytovatelé informováni, že dispečink ČEPS může nařídit změnu výkonu nebo způsobu poskytování regulované energie proti platné přípravě provozu.

Jak již bylo zmíněno v textu výše, pro kombinace OZE a BSAE jsou vhodné tzv. služby výkonové rovnováhy, kam se řadí zálohy pro automatickou regulaci frekvence (FCR), zálohy pro regulaci výkonové rovnováhy s automatickou aktivací (aFRR), zálohy pro regulaci výkonové rovnováhy s manuální aktivací (mFRR), zálohy pro regulaci výkonové rovnováhy s manuální aktivací do 5 minut (mFRR₅) a zálohy pro náhradu (RR). Na základě popisu jednotlivých služeb výkonové rovnováhy (zejména skutečnosti, že služby aFRR/mFRR nejlépe fungují v kombinaci s klasickými zdroji, které dokáží udržet konstantní výkon po delší časový interval) a zkušenosti z provozu bateriového uložště skupiny E.ON v Mýdlovarech⁵⁴, bude dále voleno jen poskytování služeb FCR. Dalším důvodem je, že od 31.12.2021 je v účinnosti následující: „Poskytovatel je povinen na jednotkách poskytujících SVR držet v rámci obchodní hodiny konstantní PDG na hodnotě z poslední přijaté PP, vyjma změn popsanych v kap. 3.1.6.3 Tato povinnost neplatí pro jednotky poskytující pouze FCR⁵⁵.“

FCR⁵⁶ (Frequency Control Reserve) jsou automatickou funkcí. Spočívají v přesně definované změně výkonu jednotky v závislosti na odchylce frekvence od zadané hodnoty. Změna výkonu jednotky je určena pomocí proporcionálního regulátoru. Od vzniku nerovnováhy je aktivace potřeba do 20 sekund. Jedná se o službu, kde 1 MW výkonu odpovídá regulaci 1 MW nahoru i 1 MW dolů. Rozsah rezervovaného výkonu zařízení musí být od 1 MW do 10 MW.

Poskytovatel FCR musí na svém zařízení BSAE zajistit, aby při stavu blízkém úplnému vybití nebo nabití došlo k přechodu do tzv. rezervního módu. Při rezervním módu přestane zařízení dodávat výkon odpovídající odchylce frekvence. Zařízení v rezervním módu si nastaví novou hodnotu f_{ZAD} odpovídající střední hodnotě frekvence a reaguje pouze na odchylky od této nové frekvence. Tím je zajištěno, že nedojde k odpojení BSAE z důvodu úplného nabití nebo vybití. Schopnost dodání služby a možný poskytovatelný rezervovaný výkon musí být na Dispečink ČEPS ohlášeno den předem, a to v 10:00 hodin a následně potvrzeno ve 13:00 hodin.

Podle předpisů ENTSO-e musí být plná aktivace automatické regulace frekvence dostupná do 30 vteřin a musí svým trváním pokrýt alespoň 15 minut. Když je požadavek na změnu frekvence mimo rozmezí 49,99 Hz a 50,01 Hz, poskytovatelé jsou povinni vyslat objem požadovaný provozovatelem PS. Po 30 vteřinách je FCR postupně nahrazováno aFRR.

aFRR (automatic Frequency Restoration Reserve) je zprostředkována na základě změny hodnot výkonu regulované jednotky tak, jak je požadováno z Dispečinku ČEPS. Doba do plné aktivace je 7,5 minuty. Jedná se o asymetrickou zálohu, to znamená, že se nakupuje záporná nebo kladná služba.

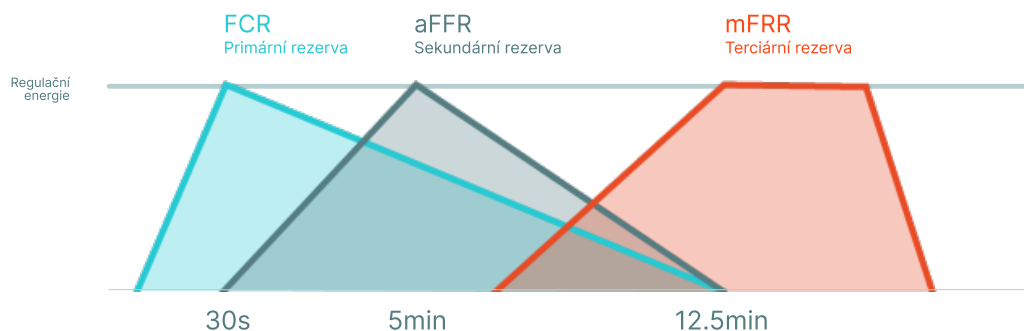
⁵⁴ [25] JURÍK, Michal. *Zapojení baterie Mýdlovary pro poskytování podpůrných služeb v rámci projektu Elfex* [online]. 2012 [cit. 2023-2-12].

⁵⁵ [9] ČEPS a.s., „KODEX PŘENOSOVÉ SOUSTAVY Část 2. Podpůrné služby (PpS)“, s. 214, 2016. [cit. 2023-10-18]. Str. 17.

⁵⁶ FCR je dimenzováno tak, aby bylo schopné pokrýt výpadek největšího zdroje v soustavě. Díky propojení podpůrných služeb v rámci EU, je největším zdrojem jaderná elektrárna ve Francii o výkonu 3 000 MW. Tento výkon musí být pokryt v rámci celé propojené soustavy, což ČR přisuzuje výkon 76 MW.

mFRR (manual Frequency Restoration Reserve) je zprostředkována na základě změny hodnot výkonu regulované jednotky tak, jak je požadováno z Dispečinku ČEPS. mFRR probíhá jako plánovaná nebo přímá aktivace. Doba plné aktivace mFRR je 12,5 minuty.

RR (Restoration Reserve) slouží jako zálohy činného výkonu, které jsou k dispozici při obnově nebo podpoře jednotlivých úrovní FRR. Jedná se o asymetrickou zálohu. Doba aktivace je do 30 minut. RR jsou nabízené jako volné nabídky, nedochází tedy k platbě za rezervaci regulačního výkonu, ale pouze k platbě za regulační energii.



Obr. 33- Graf časového průběhu poskytování SVR [25]

3.3 Analýza dat

Na úvod této kapitoly je třeba uvést fakt, že analýza dat výroby/spotřeby je velice obtížná, jelikož jsou data značně proměnná a závislá na mnoha podmínkách. Dosažitelný výkon, který lze vyvést na svorky generátoru, je dán vztahem:

$$P_{VE} = \rho * h * g * Q * \eta [W] \quad (3.1)$$

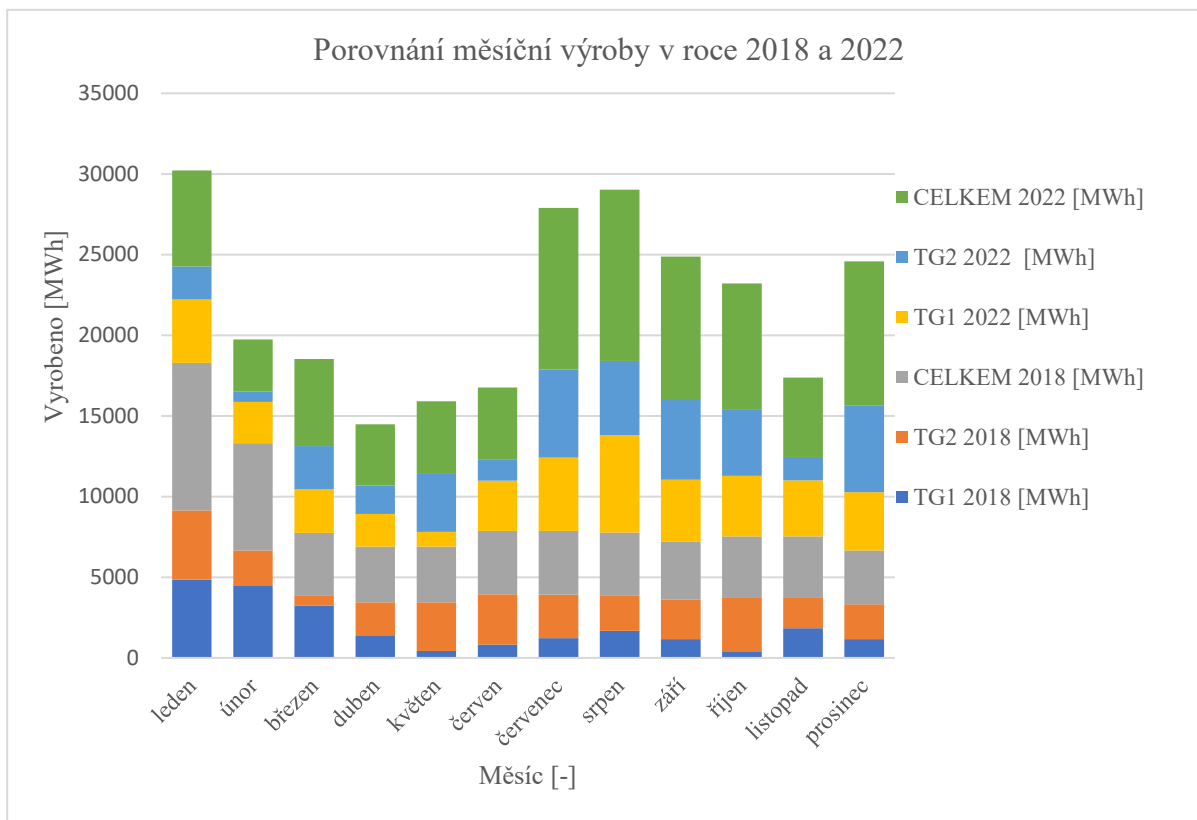
kde,

Q	... průtok turbínou [m ³ /s],
ρ	... hustota vody [kg/m ³],
g	... tíhové zrychlení [m/s ²],
h	... výškový rozdíl nádrží (spád) [m],
η	... účinnost turbíny [%].

Proměnné ve výrobě jsou tedy průtok a spád. S tím souvisí i poloha Štěchovic, která plní svou funkci ve Vltavské kaskádě, což ovlivňuje výrobu, jelikož vyrovnává odtok ze Slap, Orlíku a Vrané. Provoz VE musí být zajištěn v souladu s manipulačním a provozním řádem.

Samozřejmě je ještě každý rok jiný zejména v počtu srážek, množství sněhu, teploty. Jelikož se jedná o špičkovou elektrárnu, která „najíždí“ v případě, kdy je třeba vyrovnat přebytky/nedostatky v síti, je v provozu jen určitou část dne. Z denního diagramu výroby plyne, že elektrárna je v provozu v ranní a večerní špičce. Momentálně jsou však ve hře i fotovoltaické elektrárny, jejichž výrobu nelze regulovat uzavřením přívodu vody na turbínu, a tak (zejména v ranní špičce, ve večerní špičce je výroba z FVE v zimě a na podzim minimální) přebírají vyrovnávací funkci v síti.

Mezi jasné trendy, které lze ve výrobě sledovat patří například rozdíl mezi ročními obdobími, kdy na jaře očekáváme více vody (v důsledku tání sněhu) než v létě (sucho, FVE), viz Obr⁵⁷. Výroba je ovlivněna počtem provozních hodin, které jsou dány provozními podmínkami (minimální spád a průtok, minimální průtok činí $40 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), situací v síti a podmínkami povodí. Z Obr. je patrné, že v roce 2022 bylo vyrobeno více energie než v roce 2018. Dále lze grafu vyčíst, že léto 2022 bylo nadstandardně deštivé. Obecně měsíční křivka výroby 2018 neodpovídá měsíční křivce výroby 2022, což jen potvrzuje proměnlivost dat.



Obr. 34- Porovnání měsíční výroby v roce 2018 a 2022 [37]

Pro tuto práci vhodnější a pro nalezení adekvátní kapacity baterie přesnější je diagram denní výroby středotlaké elektrárny, a to soustrojí TG1 i TG2. V Příloze 1 jsou uvedeny průběhy naměřených denních dat v jednotlivých měsících v roce 2022/2023. V Tabulce jsou následně shrnuta data, která vycházejí z denních diagramů výroby a jsou klíčová pro návrh kapacity.

Měsíc	Max [MWh]	Čas	Min [MWh]	Čas	Průměrný výkon [MW]	Počet provozních hodin [h]
Leden	17,60	18:00	10,00	1:00	8,07	739,0
Únor	16,92	3:00	10,11	12:00	7,05	456,0
Březen	15,99	3:00	9,92	23:00	7,78	692,0
Duben	17,31	19:00	8,57	1:00	7,27	522,0
Květen	15,94	0:00	10,23	16:00	7,26	621,0
Červen	14,45	20:00	8,00	2:00	7,90	563,0

⁵⁷[37] Mensuál skutečnost EŠT1. 2018. 2022. Štěchovice: ČEZ a.s.

Měsíc	Max [MWh]	Čas	Min [MWh]	Čas	Průměrný výkon [MW]	Počet provozních hodin [h]
Červenec	14,13	21:00	3,19	16:00	9,01	1112,0
Srpen	13,89	20:00	4,57	14:00	9,12	1165,0
Září	14,15	19:00	3,90	12:00	8,86	931,0
Říjen	16,27	19:00	9,86	1:00	8,58	913,0
Listopad	16,63	17:00	6,39	3:00	7,68	641,0
Prosinec	16,98	2:00	9,60	1:00	8,54	1049,0
Shrnutí	17,60	/	10,23	/	8,09	783,67⁵⁸

Tabulka 8- Shrnutí dat z denních diagramů výroby

Dále lze analýzou naměřených výrobních dat zjistit, že zhruba 97 % vyrobené energie je vyvedeno do sítě, zbylá 3 % jsou zahrnuta ve výpadcích, které průměrně činí 0,8 MW/měsíc a ve ztrátách.

Pokud bychom uvažovali tuto skutečnost, výsledné hodnoty z Tabulky 8 by vypadaly následovně, viz Tabulka 9.

Vlastní a ostatní spotřeba elektrárny odpovídá 15 kWh na 1 MWh výroby (což dle průměrného výkonu činí spotřebu 0,12 MWh). Elektrárna je v provozu zhruba 54 % hodin z celého měsíce, což dle denních diagramů výroby odpovídá zejména večerním a ranním špičkám.

Shrnutí	Max [MWh]	Čas	Min [MWh]	Čas	Průměr [MW]
Dodáno do sítě	17,01	/	9,92	/	7,53

Tabulka 9- Shrnutí dat diagramů výroby – realita dodání do sítě



Obr. 35- Průběh výkonu v jednotlivých měsících 2022

⁵⁸ Jedná se o celkový počet provozních hodin, tj. součet TG1 a TG2.

3.4 Výběr technologie baterií

Jak již bylo uvedeno výše v Kapitole 2.2.3 nejvhodnějšími adepty pro využití v kombinaci s OZE jsou Li – Ion baterie, vadium – redoxová baterie a zinek – bromidová baterie.

3.4.1 Li – Ion baterie

Z hlediska investičních nákladů jsou optimální Li – Ion baterie. Mezi další výhody Li-ion baterie patří vysoká energetická hustota, dlouhá životnost, nízká míra samovybití, vysoké provozní napětí (provoz s ekvivalentním napětím s nižším odběrem proudu), žádný paměťový efekt (neztrácí kapacitu při opakovaném částečném nabíjení a vybíjení). Nevýhodou Li – Ion baterií je bezpečnost (přehřátí, riziko požáru), požadavek na systémové řízení (zajištění ochrany proti přebíjení a hlubokému vybíjení), stárnutí (životnost je ovlivněna počtem cyklů, degradace).

3.4.2 Vadium – redoxové baterie

Výhodou vadium – redoxové i zinek – bromidové baterie je vysoký počet cyklů, avšak v tomto případě, kdy bude baterie primárně sloužit ve službách elektrizační soustavy, není třeba předpokládat vysokou frekvenci spínání. Další výhodou je vysoká účinnost (krátká doba odezvy, nezávisle laditelný jmenovitý výkon a energetická kapacita), škálovatelnost (flexibilita konstrukce, přizpůsobitelnost libovolné kapacitě výstupního výkonu), bezpečnost (nepředstavují riziko požáru). Nevýhodou jsou vysoké počáteční náklady, nízká hustota energie (nízká objemová kapacita pro ukládání energie, která je omezena rozpustností aktivních látek v elektrolytu), velká velikost, drahá iontově výměnná membrána (podílí se na celkových nákladech na baterii z více než 40 %).

3.4.3 Zinek – bromidové baterie

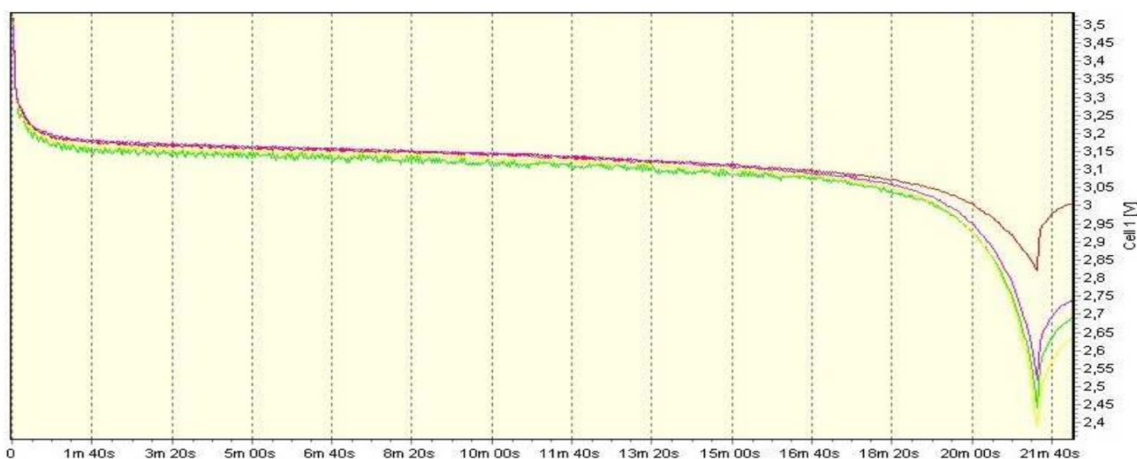
Aby byl přehled kompletní, budou uvedeny i vlastnosti zinek – bromidových baterií. Mezi výhody patří škálovatelnost na velké kapacity, dlouhá životnost (více než 5000 cyklů), nízké riziko požáru (elektrolyty jsou nehořlavé), není potřeba chladících systémů, levné a snadno dostupné materiály, snadná recyklace po skončení životnosti. Mezi nevýhody patří nižší energetická hustota, nižší obousměrná účinnost, požadavek na úplné vybití každých několik dní (baterie je občas třeba zcela vybit, aby se zabránilo proražení separátoru zinkovými dendrity), nižší rychlost nabíjení a vybíjení.

Na základě výše uvedených specifikací bude v této práci implementováno Li – Ion bateriové uložení. Jedná se o nejvíce dostupnou technologii a na trhu lze tedy najít několik možností a dodavatelů. Co se týče vadium – redoxové a zinek – bromidové baterie, jejich největší nevýhodou je vyšší pořizovací cena a provozní vlastnosti, které neodpovídají požadavkům využití baterie v případě VE Štěchovice (nebude možné zaručit plné vybití, jelikož se poptávka po energii řídí stavem v síti, chceme baterie využívat ve smyslu služeb pro elektrizační soustavu, je žádoucí rychlé nabíjení a vybíjení. Dále je třeba si uvědomit, že jsme limitováni prostorem elektrárny, tudíž chceme co nejmenší velikost bateriového uložení, což vanad – redoxová baterie nesplňuje).

Budou uvažovány konkrétně LFP (Lithium Iron Phosphate, LiFePO_4) baterie, které na rozdíl od jiných typů Li-Ion baterií, které mají katodu z kobaltu a manganu a mohou vykazovat nebezpečné reakce, jako je vzplanutí nebo dokonce exploze při zkratu nebo přebití, u baterií LiFePO_4 tato rizika neexistují. Důvod spočívá v tom, že materiál použitý pro katodu je prakticky přírodní minerál, který má podobnost s olivínem. Tento materiál neprodukuje kyslík ani při vysokých teplotách a je odolný vůči oxidaci, protože jeho chemické vazby jsou obtížně narušitelné. LFP baterie neobsahují těžké kovy jako mangan a kobalt, což představuje výhodu pro jejich potenciálně snadnou recyklaci v budoucnosti. Dokonce i v případě náhodného úniku do životního prostředí nehrozí žádné závažné škody, pouze by mohlo dojít ke ztrátě cenných surovin.

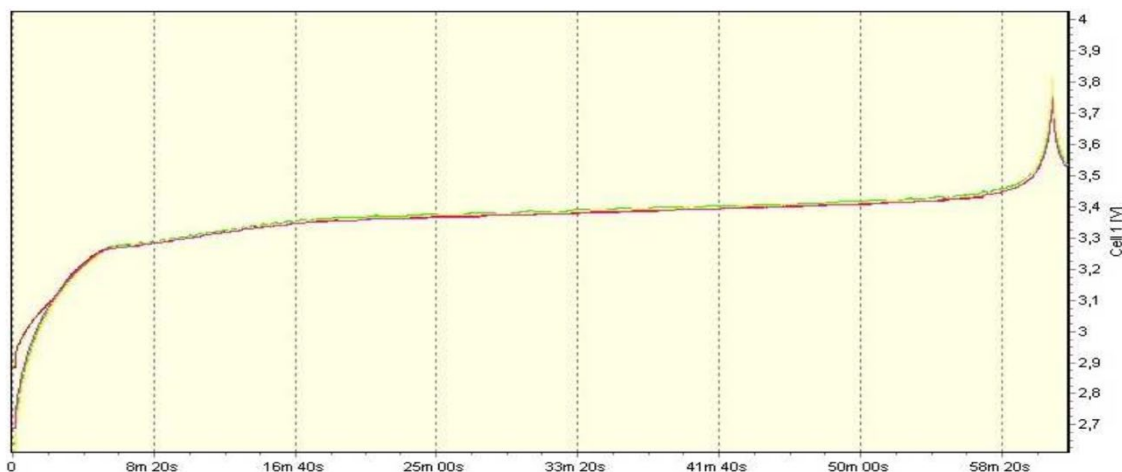
Vlastnosti LFP článků ideálně vyhovují potřebám v oblasti elektromobility a energetiky. Díky napětí 3,2 V na článek lze spojit 4 články a vytvořit baterii s napětím 12,8 V, kterou lze přímo využít jako náhradu za tradiční olověné baterie s napětím 12 V. S nízkým vnitřním odporem umožňují LFP články nabíjet a vybíjet proudy až 3C, což znamená, že baterie může být plně nabitá během pouhých 20 minut. Během provozu udržují konstantní napětí kolem 3,2 V, bez ohledu na úroveň vybití, což eliminuje potřebu dalších regulačních součástek. Nevýhodou je, že LFP články mají nižší jmenovité napětí (3,2 V) a tudíž i nižší hustotu energie na 1 kg. Navíc, v důsledku přítomnosti železa, se hmotnost článku ještě zvyšuje na výsledných cca 80–100 Wh/kg. U Li-Pol či NMC článků lze bez problémů dosáhnout hustoty dvojnásobné (160–200 Wh/kg).

V grafech níže jsou vybíjecí a nabíjecí charakteristiky LFP článků⁵⁹.



Obr. 36- Vybíjecí charakteristika proudem 3C [24]

Na Obr. 36 je vybíjecí charakteristika proudem 3C (60 A). Z grafu je čitelné, že vybití 4 z 5 článků probíhá za konstantního proudu s napětím nejméně 2,5 V. Vybíjecí čas na 2,8 V (20:50) činí 1250 s, což odpovídá kapacitě 20,83 Ah. Vybíjecí čas na 2,5 V (21:20) činí 1280 s, což odpovídá kapacitě 21,34 Ah.



Obr. 37- Nabíjecí charakteristika proudem 1C [24]

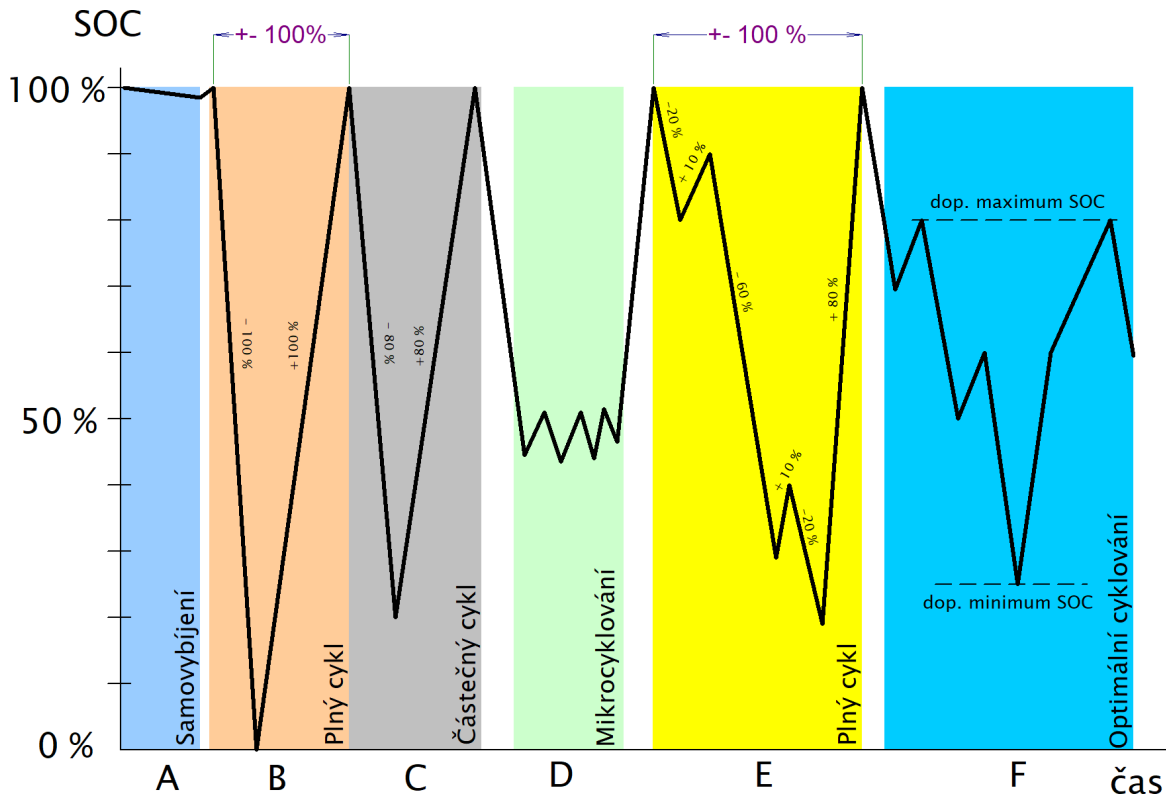
Na Obr. 37 je nabíjecí charakteristika proudem 1C (20 A). Nabíjení na napětí 3,8 V trvalo zhruba 1 hodinu.

⁵⁹ [24] JAK NA LIFEPO4 BATERIE: TECHNICKÝ PRŮVODCE V 7 KROCÍCH. Online. In: *GWL*. S. 24. Dostupné z: https://files.gwl.eu/inc/doc/LFP_Guide_CZ.pdf. [cit. 2023-12-14].

3.5 Návrh kapacity bateriového systému

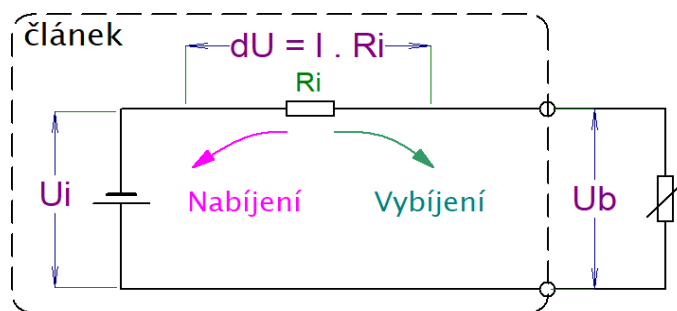
Cílem této kapitoly je navrhnout velikost kapacity bateriového uložení. Limitujícím faktorem jsou výrobní data, velikost baterie (tj. prostor k uložení v elektrárně), výkonové poměry, cykly a životnost baterie, prostředí uložení, bezpečnost.

3.5.1 Cykly a životnost baterie



Obr. 38- Popis různých typů cyklů [22]

Za cyklus je považováno jedno vybití a opětovného nabití. Baterie se během svého provozu nachází v jednom ze 3 stavů (nabíjení, vybití, samovybíjení).



$$U_i \text{ vyb} = U_b + dU = U_b + I \cdot R_i$$

$$U_i \text{ nab} = U_b - dU = U_b - I \cdot R_i$$

$$U_i \text{ nab} < U_i \text{ vyb}$$

Obr. 39- Náhradní schéma elektrochemického článku [22]

Cyklická životnost je následně dána počtem tzv. plných cyklů. Garance se nejčastěji vztahuje na pokles baterie pod 80 % původní hodnoty při C20 (u technologiích založených na lithiu se jedná o jednotky tisíců cyklů).

Životnost baterie závisí na teplotě, při které je baterie provozována/skladována, na rychlosti vybíjení a nabíjení, na hloubce vybití a době setrvání v daném stavu nabití nebo době trvání přebíjení, na použitých materiálech a kvalitě zpracování článku a elektroniky (zejména BMS, Battery Management System).

Většina bateriových systémů spolehlivě pracuje při teplotách 15°C až 35°C (u lithiových systémů je v případě vyšších teplot třeba zavést chlazení). Skladovací teplota ovlivňuje rychlost samovybíjení baterie, u lithiových článků je předpokládané samovybíjení 10 % za 5 let. Závislost samovybíjení je viditelná i na stavu nabití. Pokud je článek plně nabit, je rychlost samovybíjení přibližně dvojnásobná oproti samovybíjení při 40 % až 60 % SOC. Doporučuje se tedy skladovat lithiové baterie nabité pouze na 80 % SOC.

Na Obr. 39 je náhradní schéma elektrochemického článku. Systém lze modelovat jako sériové spojení vnitřního zdroje napětí U_i a impedance R_i . R_i způsobuje v případě průchodu vybíjecího proudu úbytek napětí dU a tím i pokles napětí na svorkách. V případě nabíjení je situace opačná a $U_b > U_i$. Chyba určení vnitřního elektrochemického napětí je tím větší, čím větší je procházející proud.

Dalším negativem velkých proudů je vznik tepla uvnitř baterie – Jouleovy ztráty na odporu přívodů, vzrůst polarizačního odporu na konci nabíjení⁶⁰.

Stav nabití (State of Charge, SOC) nebo hloubka vybití (Deep of Discharge, DOD) je veličina určující aktuální podíl energie obsažené v baterii k celkové kapacitě baterie. Zároveň platí:

$$SOC = 100 - DOD [\%] \quad (3.2)$$

Z hlediska posouzení vlivu hloubky vybití na životnost článku je potřeba zmínit vysokou odolnost lithiových technologií vůči větším hodnotám DOD – lithiové baterie jsou schopny dlouhodobě pracovat do 15 % SOC (tedy 85 % DOD), můžeme tedy využívat 85 % kapacity baterie bez rizika snížení životnosti. Naopak za velmi škodlivé jsou považovány cykly s hloubkou vybití blízkou 100 %.

State of Health (SOH) je číslo, které je zjednodušeně definováno jako poměr aktuální kapacity článku ku celkové katalogové kapacitě článku. Pro nový článek by mělo dosahovat hodnoty 1.

Rychlost nabíjení a vybíjení (C – rate). Zavedení poměrové jednotky „C“ vůči ampérhodinové kapacitě baterie. Například pro baterii s kapacitou 80 Ah je nabíjecí proud $1 C = 80 A$, $2 C = 160 A$. Následně se používá zápis např. C10, což znamená, že proudem 0,1 C vybijíme článek po dobu 10 hodin do úplného vybití (pro baterii s kapacitou 80 Ah to tedy znamená, že je vybijena proudem 8 A).

3.5.2 Výpočet kapacity

Jedním z cílů této práce je návrh optimální kapacity baterie. Jelikož se však jedná o vodní elektrárnu, která pracuje ve špičkovém režimu, je poměrně obtížné naleznout pravidelnost ve výrobních diagramech a zcela jednoduše určit kapacitu bateriového systému.

Na základě tohoto faktu jsem se rozhodla kapacitu dimenzovat na základě funkce, kterou bude v elektrárně zastávat, tj. pokrytí vlastní spotřeby (na základě domluvy s provozovatelem VE Štěchovice, nebude uvažováno zálohování Dispečerského centra,

⁶⁰ [22] HRZINA, Pavel. Cykly a životnost baterie. Online. In: Oze.tzv-info.cz. Dostupné z: <https://oze.tzv-info.cz/akumulace-elektriny/21096-cykly-a-zivotnost-baterie>. [cit. 2023-11-29].

jelikož se jedná o strategickou budovu, kde se nachází řídicí centrum pro celou Vltavskou kaskádu, a je tudíž již zálohováno několika jinými zdroji), poskytování služby výkonové rovnováhy FCR/aFRR.

Velikost kapacity baterie bude tedy ovlivněna několika faktory:

1. měnící se proměnné – výroba na svorkách soustrojí elektrárny⁶¹, odběr energie ze sítě, rezervovaný výkon pro poskytování PpS, vlastní a ostatní spotřeba,
2. technické proměnné – maximální nabití/vybití baterie, životnost, provoz,
3. uvažují, že baterie bude nabíjena/vybíjena každý den, rezervovaná kapacita baterie bude tedy v denním cyklu.

V tabulce níže jsou uvedeny technické vstupy, se kterými je nutno při návrhu kapacity baterie počítat (vycházejí z Kap. 3.5, Obr. 35 a Tabulky 3).

Parametr	Hodnota
Provozní nabití	60 %
Účinnost	92 %
Samovybití	3 %/měsíc, 0,1 %/den
Maximální nabití	85 %
Minimální nabití	15 %
Využitelná kapacita	70 %
Životnost	6000 cyklů ⁶²

Tabulka 10- Souhrn technických vstupů pro návrh baterie

Pro určení kapacity na pokrytí vlastní spotřeby generátorů je potřebný údaj, kolik hodin denně je generátor v provozu. Což lze zjistit ze vztahu:

$$t_{den} = \frac{\text{počet provozních hodin}}{\text{počet najetí generátoru}} [\text{hod}] \quad (3.3)$$

Výpočtem vztahu 3.3 pro každý generátor zvlášť bylo zjištěno, že generátor G1 je v provozu min. 8 hodin denně a maximálně 12 hodin denně. Generátor G2 je v provozu minimálně 5 hodin denně, maximálně 9 hodin denně⁶³. Samozřejmě, pokud se nejedná o stav, kdy je generátor dlouhodobě odstaven. Následně lze na základě těchto hodnot spočítat vlastní spotřebu každého soustrojí. Vycházím z předpokladu, že generátor pracuje se svým maximálním dosažitelným výkonem po maximální dobu provozu, která je dána přehledem výroby z roku 2022.

$$VS_{G1} = t_{den,max,G1} * VS_{měr} * P_{max,G1} = 12 * 0,015 * (15 * 0,8) = 2,16 \text{ MWh/den} \quad (3.4)$$

$$VS_{G2} = t_{den,max,G2} * VS_{měr} * P_{max,G2} = 9 * 0,015 * (15 * 0,8) = 1,62 \text{ MWh/den} \quad (3.5)$$

⁶¹ S tím, že jako maximálně možný dodaný výkon bude brán maximální výrobní výkon pouze jednoho soustrojí, tj. 11,25 MW. Z důvodu zajištění co možná nejspolehlivější dodávky (například pokud bude jedno soustrojí odstaveno).

⁶² Baterie bude využívána každý den, tj. 6000/365 = 16,4 roků životnosti.

⁶³ Hodnoty byly vzaty z Mensuálu výroby pro rok 2022, ale bohužel kvůli citlivosti dat, nemohly být konkrétně dosaženy.

Kde,

t_{den} ... počet hodin, kdy je generátor v provozu [hod],
 $VS_{m\acute{e}r}$... měrná vlastní spotřeba elektrárny [MWh],
 P_{max} ... maximální výkon generátoru⁶⁴ [MWh].

Dle provozovatele VE Štěchovice jsou však výše uvedené hodnoty zavádějící a je adekvátní brát v potaz symetrickou výrobu obou generátorů, výsledná vlastní spotřeba soustrojí bude tedy $VS_{G1} = VS_{G2}$.

Na základě výše uvedených výpočtů je tedy potřeba baterie o celkové kapacitě 4,86 MWh, a to v případě, že je uvažována jedna společná baterie pro obě soustrojí. Dále je nutné uvážit poskytování FCR. Minimální výkon baterie je 1 MW s tím, že služba musí garantovat využitelnost po dobu 15 min, a to pro odběr i pro dodávku do sítě. Jednoduše lze tedy odvodit, že kapacita baterie musí být navýšena o 0,5 MWh (tj. baterie musí být schopna výkon 1 MW dodávat 15 min + případně odebrat 15 min). Kapacita baterie pro poskytování služby FCR spočívá tedy v navýšení celkové kapacity baterie o možnou dodávku ze sítě, která bude muset být odebrána. Další možností však je tzv. maření energie v teple. To prakticky znamená připojení chladicího boxu paralelně k baterii, do kterého se bude „vybíjet“ nutný odběr ze sítě a měnit v teplo, které bude následně po ochlazení ventilováno ven. Chladicí box je proveden jako kontejner. Zajímavá je možnost využití tohoto přeměněného tepla k vytápění přilehlé budovy, problémem však je nahodilost využití této služby k odběru ze sítě. Toto řešení je velmi nákladné a zvedalo by neúměrně celkovou cenu investice.

Celková kapacita v případě 1 baterie by tedy měla být:

$$C_{tot} = \frac{(VS_{G1} + VS_{G2} + FCR_C)}{\eta_{bat,20} * (C_{vyu\acute{z}} - samvyb)} = \frac{2,16 + 2,16 + 0,5}{0,85 * (0,70 - 0,1)} = 8,21 \text{ MWh} \quad (3.6)$$

kde,

VS_{G1} ... vlastní spotřeba výroby G1 [MWh*den⁻¹],
 VS_{G2} ... vlastní spotřeba výroby G2 [MWh*den⁻¹],
 FCR_C ... kapacita potřebná pro poskytování FCR [MWh],
 η_{bat} ... účinnost baterie po 6000 cyklech [%],
 $C_{vyu\acute{z}}$... využitelná kapacita baterie [%],
 $samvyb$...samovybívání [%].

Kapacita, pokud bude návrh uvažovat 2 baterie, kde každá z nich zásobuje vlastní spotřebu zvlášť a poskytuje FCR.

$$C_{G1=G2} = \frac{VS_{G1,2} + FCR_C}{\eta_{bat,20} * (C_{vyu\acute{z}} - samvyb)} = \frac{2,16 + 0,5}{0,85 * (0,70 - 0,1)} = 4,54 \text{ MWh} \quad (3.7)$$

Z obecného pohledu je lepší uvažovat baterie dvě, pro každé soustrojí jednu. A to z toho důvodu, že jedna baterie by byla náročnější na celkovou kapacitu a tím pádem dražší (také v momentálních podmínkách by bylo téměř nemožné sehnat baterii, který by s výkonem

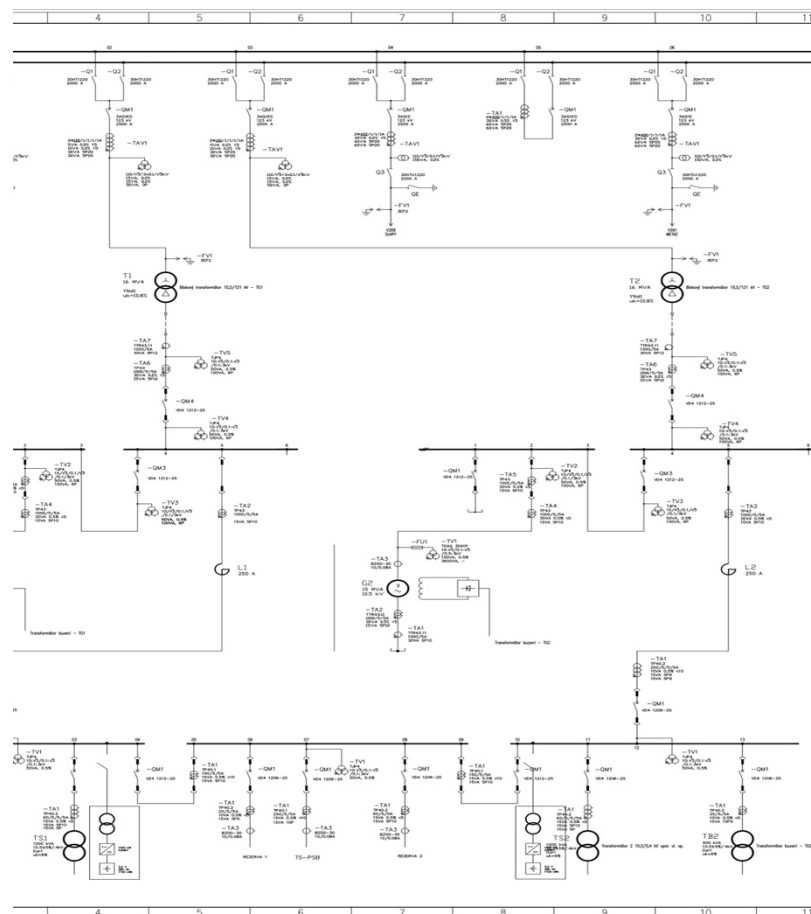
⁶⁴ Který je uveden v jednopólovém schématu jako 15 MVA, pomocí výkonového faktoru, $\cos\varphi = 0,8$, je dle vztahu $P = S*\cos\varphi$ přepočten na výkon činný. $\cos\varphi$ by zadán provotovatelem.

1 MW dokázala dodávat tak velkou kapacitu). Současně by nabíjení nebylo rovnoměrné, což by vedlo ke zkrácení životnosti baterie. V případě výpadku jednoho generátoru by baterie nebyla zcela využita a mohlo by dojít k hlubokému vybití, což také není ideální z pohledu životnosti, ani z pohledu využití baterie jako záskokového zdroje. Konečně při výpadku jednoho z generátorů, či v případě nutné údržby, kdy musí být stroj odpojen od zdroje, by celá rozvodna musela být v provozu kvůli udržení provozních standardů připojené baterie, což není ekonomické ani praktické. Vlastní spotřeba nikdy není napájena z obou generátorů současně. Jeden generátor slouží k dodávce výkonu do sítě, druhý napájí vlastní spotřebu a „zbytek“ energie dodává do sítě. Práce soustrojí je řízena dispečerským centrem elektrárny.

Dále je nutné uvést, že baterie pro vlastní spotřebu čerpá ze sítě 50 kWh/den⁶⁵ nad rámec nabíjení.

3.6 Návrh zapojení

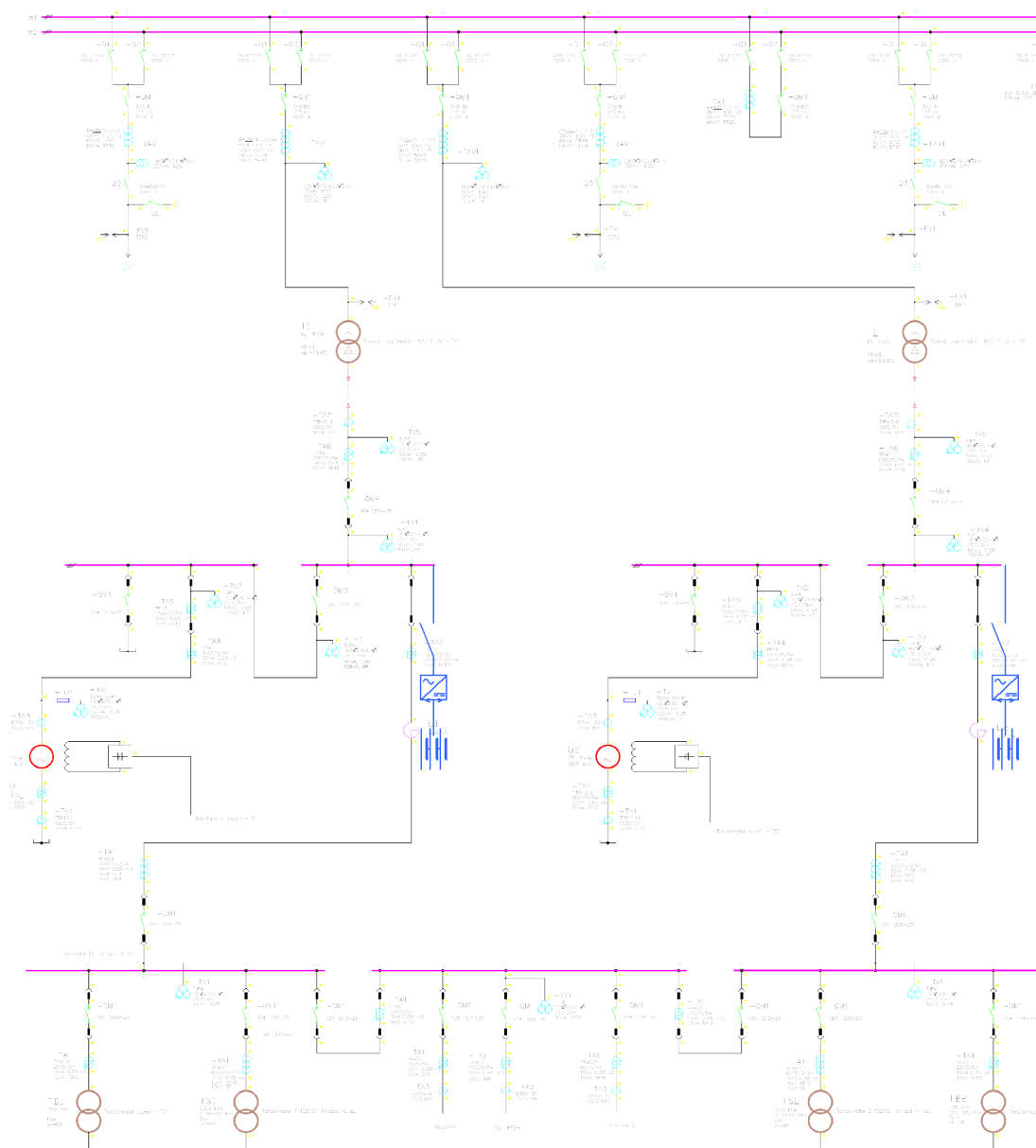
Jak již bylo uvedeno v kapitole výše, byla vyloučena možnost použití jedné společné baterie pro oba generátory, tudíž zde bude navrženo jen zapojení pro každý generátor zvlášť.



Obr. 40- Jednopolové schéma zapojení do VS

⁶⁵ [31] KURFÍRT, Martin a JURÍK, Michal. Hodnocení zkušebního provozu bateriového úložiště v Mýdlovarech. Online. In: *Sborník ČK CIREĐ*. S. 12. Dostupné z: <https://saceweb01.runblobcorewindowsnet-endpoint.azureedge.net/eonmedialibcontainer/e.on/media/documents/cired2018s4p11-baterie.pdf?guid=a9f16c1f-126e-4869-bb1c-c98fa17521f3&last-modified=637533235936050127>. [cit. 2023-12-11].

Na Obr. 40 je schéma zapojení baterií do rozvodny R10 vlastní spotřeby elektrárny. Toto zapojení je prakticky proveditelné, avšak omezující z důvodu tlumivek L1, L2, které v případě chodu obou transformátorů zabraňují průchodu bludných proudů. Na Obr. 41 je schéma, které bylo zvoleno jako nejvhodnější pro připojení bateriových bloků.



Obr. 41- Jednópolové schéma připojení baterií do rozvodny 10,5 kV

Z jednópolového schématu vycházejí další skutečnosti, které jsou nutné k návrhu baterie posoudit. Jednópolové schéma v lepším zobrazení je uvedeno jako Příloha č. 2. Z výkonového hlediska se jedná o maximální výkon, který může baterie nabývat – jelikož je požadováno vyvedení výkonu do sítě 110 kV, je nutné energii z baterie vést přes blokový transformátor T1 (T2) o výkonu 16 MVA. Soustrojí TG1 (TG2) již dosahuje výkonu 15 MVA (pokud je v provozu, což znamená, že baterie může dodávat maximálně výkon 1 MVA (což odpovídá zhruba 1 MW⁶⁶).

⁶⁶ Opět vycházíme ze vztahu $P = S \cdot \cos\varphi$, $P = 1 \cdot 0,95 = 0,95$ MW. Kde hodnota $\cos\varphi = 0,95$ je dána průměrnou hodnotou tohoto koeficientu pro vodní elektrárny.

Co se týče vlastní spotřeby soustrojí, jsou v jednopólovém schématu uvedeny transformátory vlastní spotřeby TS1 (TS2) a budicí transformátor TB1 (TB2) o celkovém výkonu 1,4 MVA. Dle provozovatele je tato hodnota vyšší než v normálních provozních podmínkách, proto je uvažováno s hodnotou menší (ve stovkách kWh). Lze tedy usuzovat, že výkon baterií o velikosti 1 MW postačí i na pokrytí vlastní spotřeby.

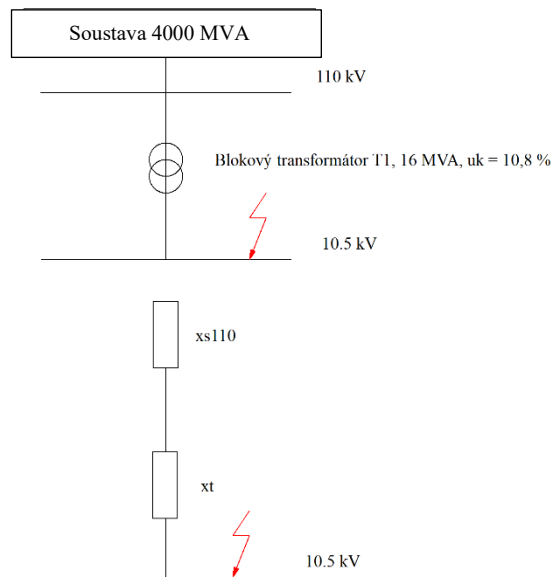
Dále je možné ze schématu vyčíst, že pro připojení baterií není již v rozvodně (R1, R2) 10,5 kV prostor a bude tedy nutné vytvořit 2 nová přípojná místa.

3.6.1 Návrh přípojných míst v rozvodně 10,5 kV

Nejprve je nutné vypočítat zkratové poměry v rozvodně a maximální možný proud dodávaný do/z baterie. Zkratové poměry jsou zásadní pro připojení nového zařízení. Pomáhají zajistit dimenzování prvků tak, aby odolaly zkratovým proudům a minimalizovali možné škody.

Zkratové poměry budou vypočítány jen v rozvodně R1, jelikož pro R2 platí totéž. Jedná se tedy o rozvodnu 10,5 kV za blokovým transformátorem T1.

Zjednodušené schéma situace vypadá následovně:



Obr. 42- Zjednodušené schéma pro výpočet zkratových poměrů

Nejprve je třeba určit vztažné hodnoty, $U_c = 10,5$ kV, $S_c = 16$ MVA. Pro určení zkratových poměrů je v první řadě třeba vypočítat poměrnou reaktanci x_c pomocí sériové kombinace jednotlivých poměrných reaktancí.

$$x_{S110} = \frac{S_c}{U_c^2} * \frac{U_s^2}{S_{KS,110}} * p_{T1}^2 = \frac{16}{10,5^2} * \frac{110^2}{4000} * \left(\frac{10,5}{121}\right)^2 = 3,31 * 10^{-3} \quad (3.8)$$

$$x_t = u_{k,t} * \frac{S_c}{U_c^2} * \frac{U_n^2}{S_{n,t}} = 0,108 * \frac{16}{10,5^2} * \frac{10,5^2}{16} = 0,108 \quad (3.9)$$

$$x_c = x_{S110} + x_t = 3,31 * 10^{-3} + 0,108 = 0,111 \quad (3.10)$$

Následně se vypočte počáteční rázový zkratový výkon S_k ze vztahu:

$$S_k = k * \frac{S_c}{x_c} = 1,1 * \frac{16}{0,111} = 158,6 \text{ MVA} \quad (3.11)$$

kde k ...rázový koeficient roven 1,1.

Jako poslední se určí počáteční rázový zkratový proud I_k , nárazový zkratový proud I_{km} a ekvivalentní oteplovací proud I_{ke} ze vztahů:

$$I_K = \frac{S_K}{\sqrt{3} * U_c} = \frac{158,6}{\sqrt{3} * 10,5} = 8,7 \text{ kA} \quad (3.12)$$

$$I_{km} = \sqrt{2} * K * I_K = \sqrt{2} * 1,6 * 8,7 = 19,7 \text{ kA} \quad (3.13)$$

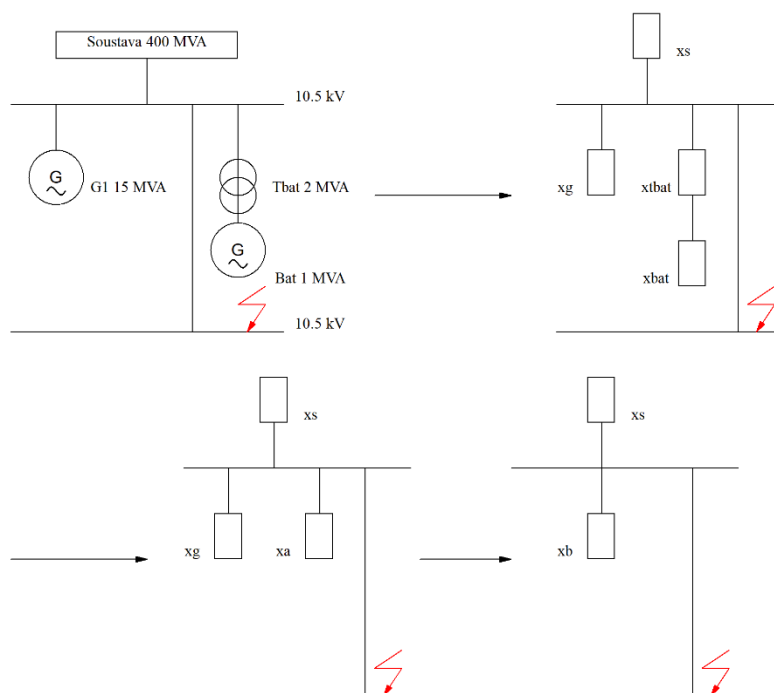
kde K ...součinitel pro výpočet nárazového proudu roven 1,6.

$$I_{ke} = k_e * I_K = 1,4 * 8,7 = 12,18 \text{ kA} \quad (3.14)$$

Kde k_e ...součinitel pro výpočet ekvivalentního oteplovacího proudu roven 1,4.

Baterie i nové přípojné místo v rozvodně R1 (R2) tedy musí být dimenzováno na tyto proudy výběrem vhodných ochran.

Teoretický výpočet zkratových poměrů mezi rozvodnami R1 (R2) a rozvodnou vlastní spotřeby na stejné napěťové hladině by vypadal následovně:



Obr. 43- Teoretické schéma zapojení baterie k výpočtu zkratových poměrů

Baterie je na základě teoretických předpokladů převedena do sériového zapojení generátoru (tj. zdroje) a transformátoru.

Hodnoty pro výpočet zkratových poměrů byly převzaty z jiných zdrojů stejné funkce⁶⁷, v případě baterie zvoleny na základě existujících bateriových systémů a zveřejněných dat:

- uk pro T_{bat} je 6,8 %⁶⁸,
- napěťový poměr pro T_{bat} je 10,5/0,69 kV, kde 690 V⁶⁹ odpovídá požadovanému provoznímu napětí baterie, T_{bat} je o výkonu 1250 kVA⁷⁰,
- výkon baterie je 1 MVA, což odpovídá x_d ⁷¹ = 1,2 %,
- výkon generátoru G1 je 15 MVA, což odpovídá x_d = 13 %.

Nejprve je třeba určit vztažné hodnoty $U_c = 10,5$ kV, $S_c = 1,25$ MVA a následně vypočítat poměrnou reaktanci x_c .

$$x_{S10,5} = \frac{S_c}{U_c^2} * \frac{U_S^2}{S_{KS10,5}} * p_{Tbat}^2 = \frac{1,25}{10,5^2} * \frac{10,5^2}{400} * \left(\frac{10,5}{0,69}\right)^2 = 0,724 \quad (3.15)$$

$$x_g = x_d'' * \frac{S_c}{U_c^2} * \frac{U_n^2}{S_g} = 0,13 * \frac{1,25}{10,5^2} * \frac{10,5^2}{15} = 0,011 \quad (3.16)$$

$$x_{Tbat} = u_k * \frac{S_c}{U_c^2} * \frac{U_n^2}{S_{Tbat}} = 0,068 * \frac{1,25}{10,5^2} * \frac{0,69^2}{1,25} = 0,294 * 10^{-3} \quad (3.17)$$

$$x_{bat} = x_d'' * \frac{S_c}{U_c^2} * \frac{U_n^2}{S_{bat}} * p_{Tbat}^2 = 0,012 * \frac{1,25}{10,5^2} * \frac{0,69^2}{1} * \left(\frac{10,5}{0,69}\right)^2 = 0,015 \quad (3.18)$$

$$x_a = x_{bat} + x_{Tbat} = 0,015 + 0,294 * 10^{-3} = 0,015 \quad (3.19)$$

$$x_b = \frac{x_a * x_g}{x_a + x_g} = \frac{0,015 * 0,011}{0,015 + 0,011} = 6,346 * 10^{-3} \quad (3.20)$$

$$x_c = x_b + x_{S10,5} = 6,346 * 10^{-3} + 0,724 = 0,730 \quad (3.21)$$

Následně je tedy možné vypočítat zkratový výkon ze vztahu (3.22).

$$S_k = k * \frac{S_c}{x_c} = 1,1 * \frac{1,25}{0,730} = 1,884 \text{ MVA} \quad (3.22)$$

⁶⁷ [66] 2 MVA 2000 KVA 11KV až 415V sestupný. Online. In: Scotech. Dostupné z: <http://cz.scotech-electrical.com/transformer/distribution-transformer/2-mva-2000-kva-11kv-to-415v-step-down.html>. [cit. 2023-12-12].

⁶⁸ Transformátor je součástí technologie bateriového uložení a je dodáván spolu s články a invertorem v kontejneru.

⁶⁹ 690 V je napětí nejčastěji volené pro provoz bateriových uložení.

⁷⁰ Tento výkon transformátoru odpovídá výkonu transformátoru, který je použit v Mýdlovarech pro stejný výkon bateriového uložení.

⁷¹ [65] Zkratové poměry - výpočet velikosti zkratových proudů. Online. In: Západočeská univerzita. Dostupné z: https://home.zcu.cz/~nohac/EE1/CV-EE1-5-Dimenzovani_vodicu_2.pdf. [cit. 2023-12-12].

Jako poslední se určí počáteční rázový zkratový proud I_K , nárazový zkratový proud I_{km} a ekvivalentní oteplovací proud I_{ke} ze vztahů:

$$I_K = \frac{S_K}{\sqrt{3} * U_c} = \frac{1,884}{\sqrt{3} * 10,5} = 0,104 \text{ kA} \quad (3.23)$$

$$I_{km} = \sqrt{2} * K * I_K = \sqrt{2} * 1,6 * 0,104 = 0,234 \text{ kA} \quad (3.24)$$

$$I_{ke} = k_e * I_K = 1,4 * 0,104 = 0,146 \text{ kA} \quad (3.25)$$

Dle výše uvedených výpočtů je nutné zkontrolovat jednopólové schéma, zda jsou všechny ochrany/přístroje dimenzovány na tyto zkratové proudy. V cestě do rozvodny 10,5 kV vlastní spotřeby stojí proudový transformátor 1000/5/5 A, ten by měl z pohledu zkratových proudů zůstat nezměněný. Před rozvodnou 10,5 kV vlastní spotřeby je vakuový vypínač QM1 (VD4 1206-25), který je dimenzován na jmenovitý proud 630 A a na zkratový proud 25 kA. Vyvedení výkonu baterie z rozvodny R1 do rozvodny vlastní spotřeby by z tohoto pohledu mohlo zůstat neměnné.

Dále je třeba vypočítat jmenovitý proud z generátoru G1 do T1:

$$I_{G,10,5} = \frac{S_{n,G}}{\sqrt{3} * U_n} = \frac{15 * 10^6}{\sqrt{3} * 10,5 * 10^3} = 824,63 \text{ A} \quad (3.26)$$

kde,

$S_{n,G}$... jmenovitý výkon generátoru [VA],
 U_n ... jmenovité napětí [V].

Následně vypočítám jmenovitý proud z T1 do přípojnic rozvodny 110 kV:

$$I_{G,110} = I_{G,10,5} * p_{T1} = 824,63 * \frac{10,5}{121} = 71,55 \text{ A} \quad (3.27)$$

kde,

p_{T1} ... převod transformátoru T1 [-].

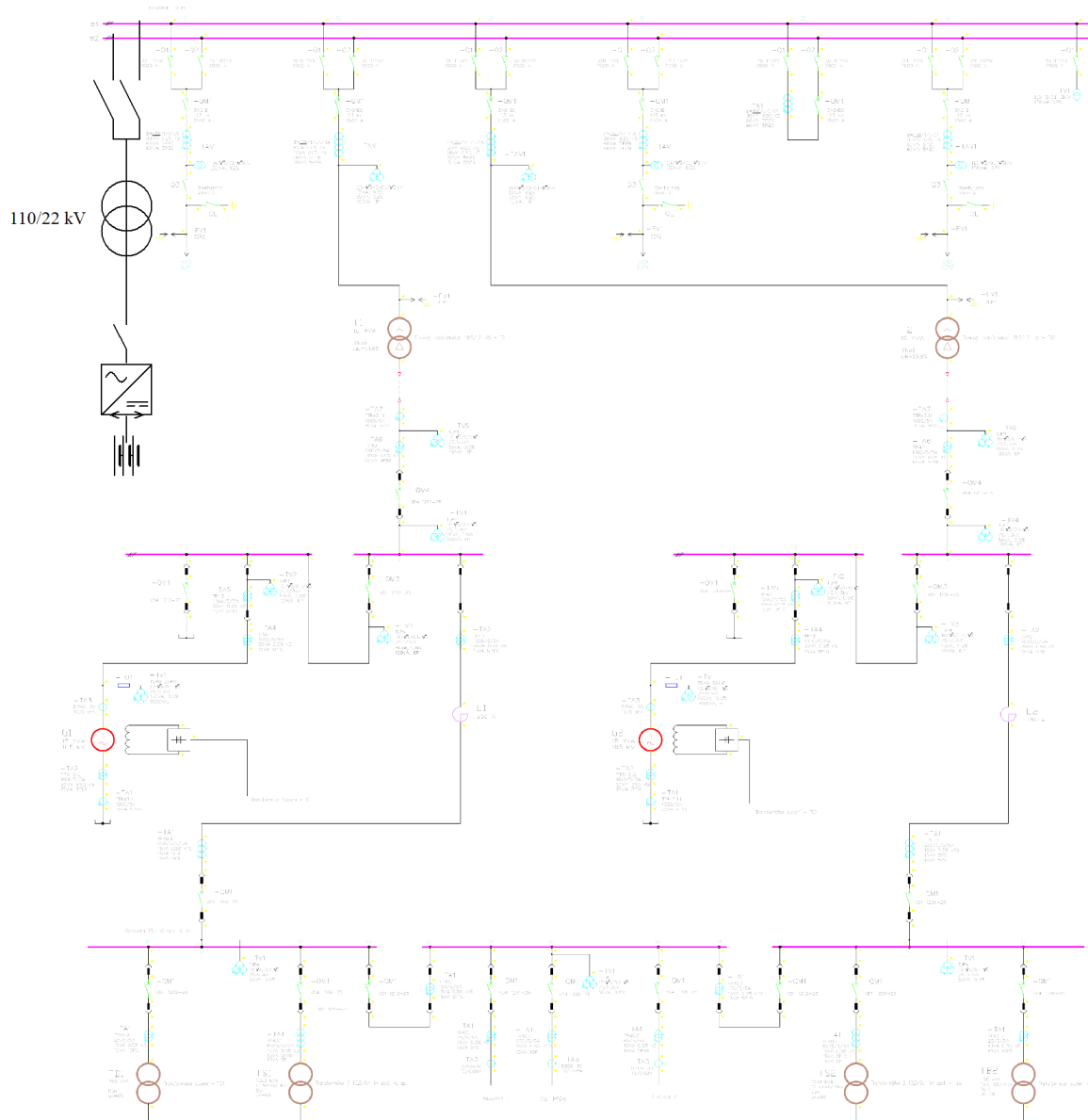
Maximální možný proud dodávaný do/z baterie je omezen hodnotami proudů v rozvodně 10, kV R1 (R2). Jmenovitý proud v rozvodně je 1250 A, zkratové proudy byly vypočítány výše, $I_K = 8,7 \text{ kA}$, $I_{km} = 19,7 \text{ kA}$, $I_{ke} = 12,18 \text{ kA}$.

3.6.2 Nutné úpravy pro možnost připojení baterie o větším výkonu

Do budoucna, kdy lze očekávat, že se baterie stanou levnějším, žádanějším a technologicky dokonalejším akumulacním systémem, může provozovatel elektrárny požadovat navýšení kapacity/výkonu baterie.

Jak je z jednopólového schématu patrné, momentálně je elektrárna limitována blokovými transformátory T1, T2, které byly pravděpodobně navrženy s co největší ekonomickou úsporou k soustrojí TG1/TG2, a tudíž nemají rezervu pro převádění většího výkonu. Jednou z možností navýšení výkonu je tedy navýšení výkonu blokových transformátorů dle potřeby nové baterie.

Další možností je vytvoření nového přípojného místa ze sítě 110 kV. Ideálním (avšak ekonomicky náročným) řešením by byla instalace transformátoru 110/22 kV a zavedení nové rozvodny 22 kV, která by obsahovala vývody pro baterii. Rozvodna 110 kV je tvořena deseti vývody, avšak všechny jsou již „obsazeny“, tudíž by bylo nutno rozvodnu rozšířit a vyvést další pole pro baterii. Vyšší napětí (22 kV ku 10,5 kV) by umožňovalo přenos většího výkonu při zachování stejných parametrů proudu a snížení přenosových ztrát.



Obr. 44- Možné schéma zapojení baterie do rozvodny 22 kV

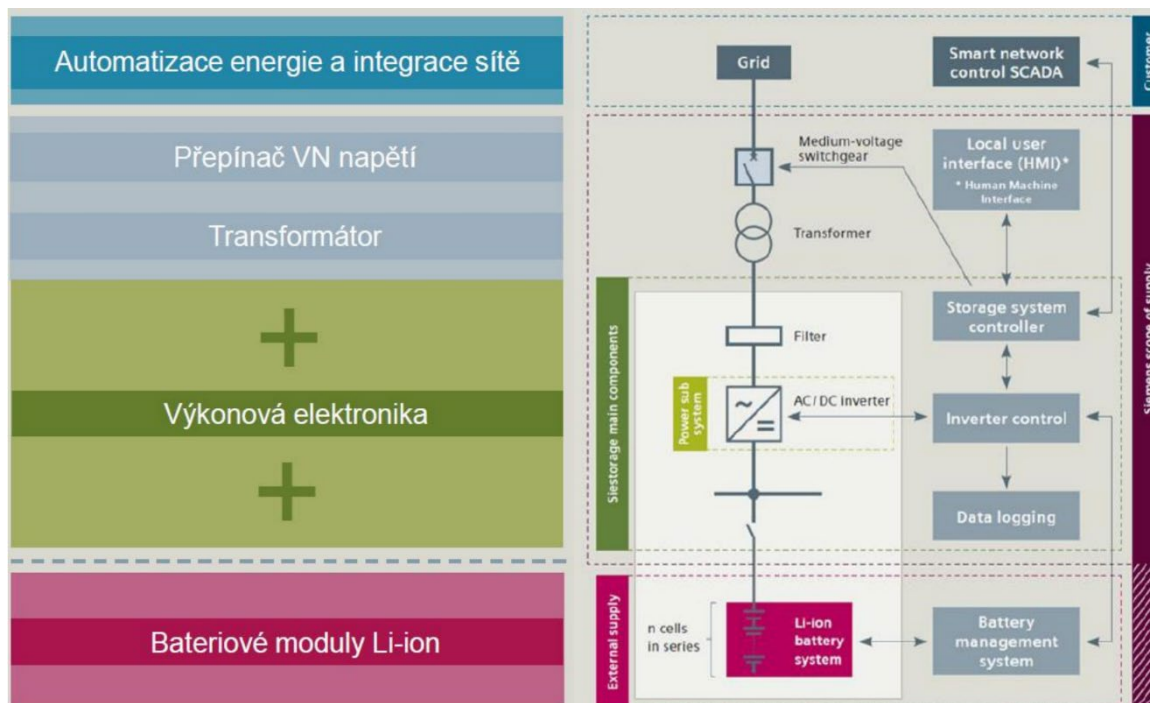
3.7 Výběr bateriového systému

Výběr konkrétních bateriových systémů je poměrně náročný z pohledu momentální nabídky těchto velkokapacitních úložišť. Implementace takto velkých, „megawattových“ úložišť není v současnosti v České republice častou praktikou, tudíž je komplikované najít dodavatele, který by odpovídal všem požadovaným/vypočteným parametrům.

Předpokládám, že baterie bude v kontejnerovém provedení rozdělena na dva celky:

- bateriová trafostanice VN/NN,
- bateriový kontejner NN (rozdělen na část střídačů a část bateriovou).

Na obrázku níže je zjednodušené schéma bateriového uložení.



Obr. 45- Zjednodušené schéma řezu bateriového uložení [25]

Baterie využití v systému 1 a Systému 2 jsou stejné, jen způsob provozu je odlišný.

Bohužel technologie bateriových uložení není ještě tak dokonalá na to, aby výrobci byli schopni dodávat baterie o „nekonečných kapacitách“. Tudiž byl konkrétní výběr systému velmi striktně podroben možnostem, které jsou k tomuto roku 2023 dostupné. Kapacita téměř 5 MWh o maximálním výkonu 1 MW není dosažitelná (je také nutné počítat s vytypovaným místem, kde bude uložení umístěno), tím pádem jsem volila baterii, která je dostatečně nadimenzována na zálohování vlastní spotřeby, což je dle slov provozovatele dostačující i o velikosti 720 kWh⁷² (pokud by šlo opravdu jen o napájení nouzových zdrojů například při startu ze tmy). Hledala jsem tedy uložení o výkonu 1 MW a minimální kapacitě 1,22 MWh.

Zvolena byla baterie LiFePO₄ Megatron 1 MW – 1,2 MW firmy Symtech Solar⁷³ (výňatky z datasheetu viz Příloha 3). Bateriové uložení je složeno z tzv. stringů S344, které obsahují 24 článků (o kapacitě 14,336 kWh). Kapacita stringu je 344 kWh, jmenovité napětí 1228,8 V, nabíjecí napětí 1363,2, vybíjecí napětí 1075,2 V, jmenovitý proud 350 A (nabíjecí/vybíjecí proud 0,5C).

⁷² Také je nutné zmínit, že vlastní spotřeba je napájena vždy z jednoho generátoru, druhý generátor odevzdává veškerou vyrobenou energii do sítě. Avšak v případě, že budou před startem ze tmy obě baterie nabitě, lze předpokládat, že bude do vlastní spotřeby dodáváno 2*720 kWh.

⁷³ [46] SYMTECH SOLAR. MEGATRON 1MW BATTERY STORAGE SYSTEM. Online. 2008, 2023. Dostupné z: <https://www.symtechsolar.com/battery-energy-storage-systems/1mw-battery-energy-storage-system/>. [cit. 2023-12-15].

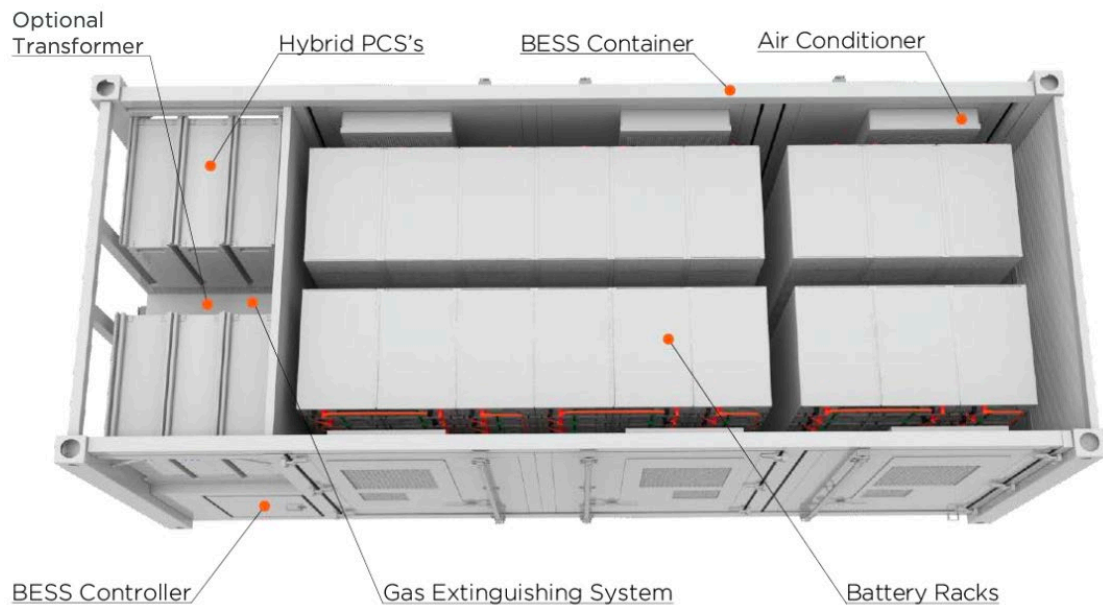
K těmto stringům jsou sériově připojeny čtyřkvadrantové střídače (umí pracovat s libovolným účinníkem – jednotka může do sítě dodávat nebo z ní odebírat jalový výkon) o výkonu 200 kW a s maximálním proudem 184,1 A. Dále je připojen jistič s pojistkou na 250 A a řídicí systém (BMS, Battery Management System).

BMS hlídá každý článek akumulátoru zvlášť, a to jak při vybíjení, tak i při nabíjení. Díky BMS baterie dosahuje požadované bezpečnosti, životnosti a spolehlivosti. Při nabíjení hlídá články proti přebíjení, při vybíjení proti podbíjení.

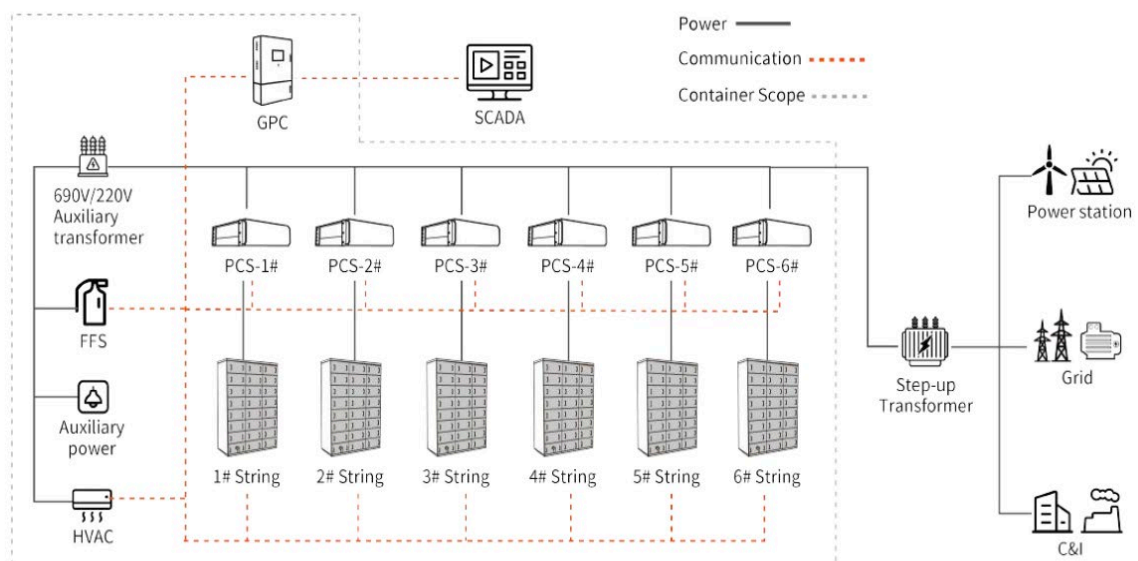
Pokud je BMS balancerem, balancuje články v okamžiku klidu na stejnou úroveň. BMS v této baterii je provozován na 220 V a má rozměry 0,48x0,23x0,77 m.

Kontejner je řešen jako ocelový svařenec s vestavěnou vnitřní příčkou pro oddělení technologií.

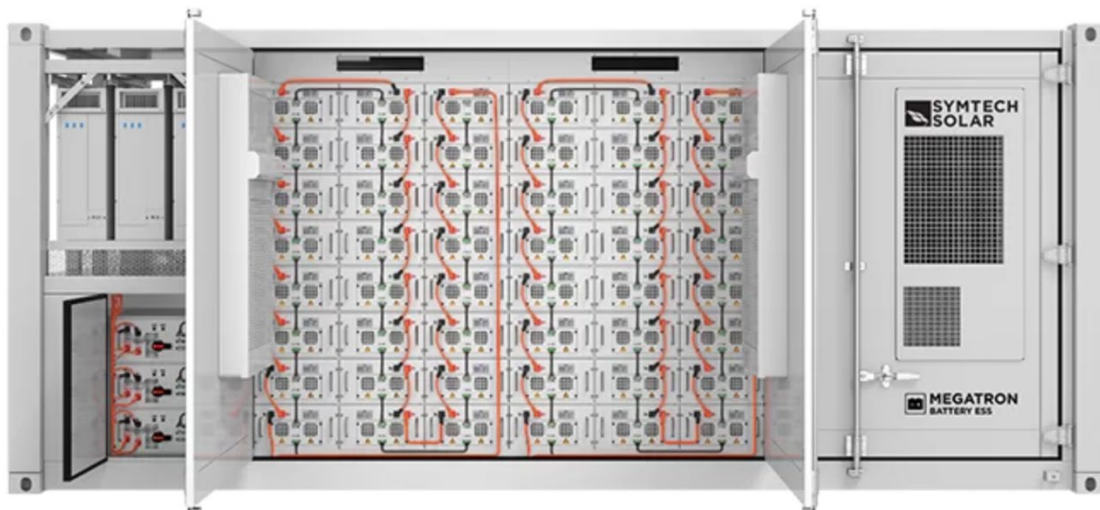
Níže je uvedeno schématické zapojení uvnitř kontejneru.



Obr. 46- Schéma prvků uvnitř kontejneru [46]



Obr. 47- Schématické zapojení prvků baterie Megatron 1,2 MW [46]



Obr. 48- Reálné provedení uložště [46]

Popis	Hodnota
Jmenovité napětí	690 V
Jmenovitý proud	669,4 A
Kapacita	1720 kWh
Využitelná kapacita (80 %)	1376 kWh
Velikost	6,058x2,438x2,591 m
Hmotnost kontejneru	23 t
Životnost	5000 cyklů/13,7 let

Tabulka 11- Celkové specifikace zvoleného uložště [46]

3.7.1 Schéma zapojení vybraného systému do schématu

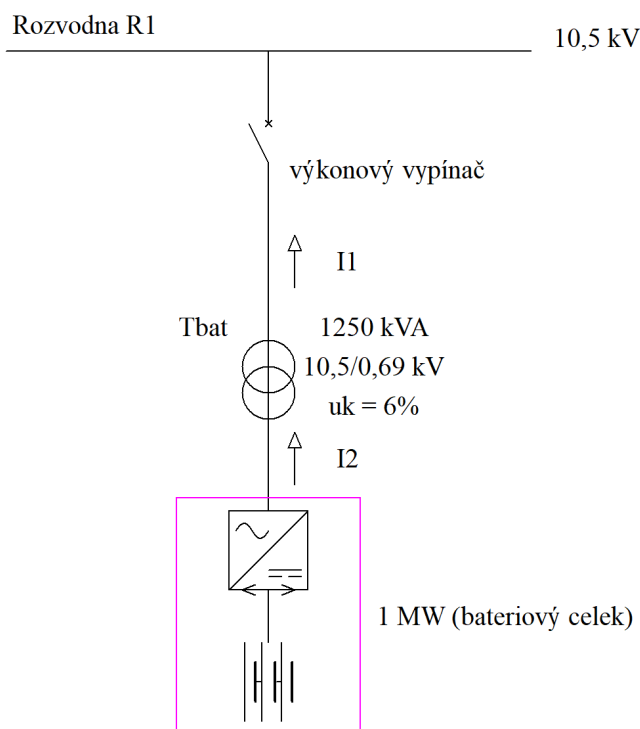
Díky konkrétním hodnotám, které lze najít v datasheetu vybraného uložště, je možné navrhnout přesné schéma zapojení.

Jak bylo uvedeno výše, baterie budou připojeny do rozvodny R1 a R2. Jak je však patrné z jednopólového schématu a dalších poskytnutých dokumentů, není možné baterie do stávající rozvodny připojit, jelikož nedisponují volným přípojným místem. Na základě této skutečnosti jsem se rozhodla navrhnout nový rozvaděč R1 (R2). Původní rozvodné skříně jsou poměrně zastaralé (viz Obr. 49) a bylo by velmi složité nakonfigurovat šestou skříně pro baterii tak, aby odpovídala stávající rozvodně. Mimo jiné by byl také problém s prostorovým rozložením skříní v rozvodně.



Obr. 49- Fotografie stávající rozvodny R1 + R2 + R10

Ještě před návrhem zapojení baterie do rozvaděče je však nutné zjistit proudové poměry dle schématu viz Obr. 50.



Obr. 50- Schéma pro výpočet proudů

Maximální proud, který vychází ze střídače již znám, dle datasheetu je roven 184,1 A. Jelikož se proudy v paralelním zapojení z Kirchhoffova zákona sčítají, výsledný proud I_2 bude roven pětinásobku proudu, který vychází ze střídače, tj. $I_2 = 920,5$ A. Je tedy potřeba dopočítat už jen transformovaný proud I_1 .

$$I_1 = I_2 * p_{Tbat} = 920,5 * \frac{0,69}{10,5} = 60,49 \text{ A} \quad (3.28)$$

Kde,

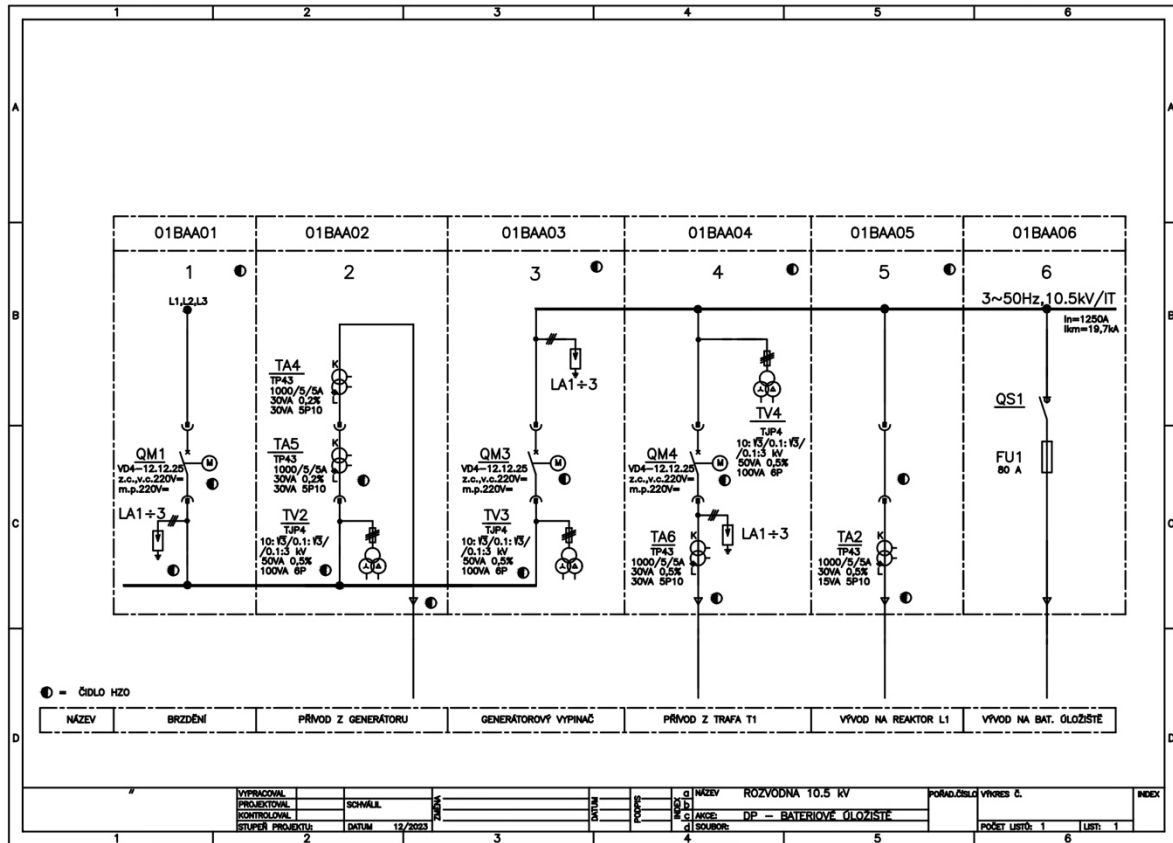
p_{Tbat} ... převod transformátoru T_{bat} [-].

Proud I_1 je současně i maximální možný proud dodávaný z/do baterie.

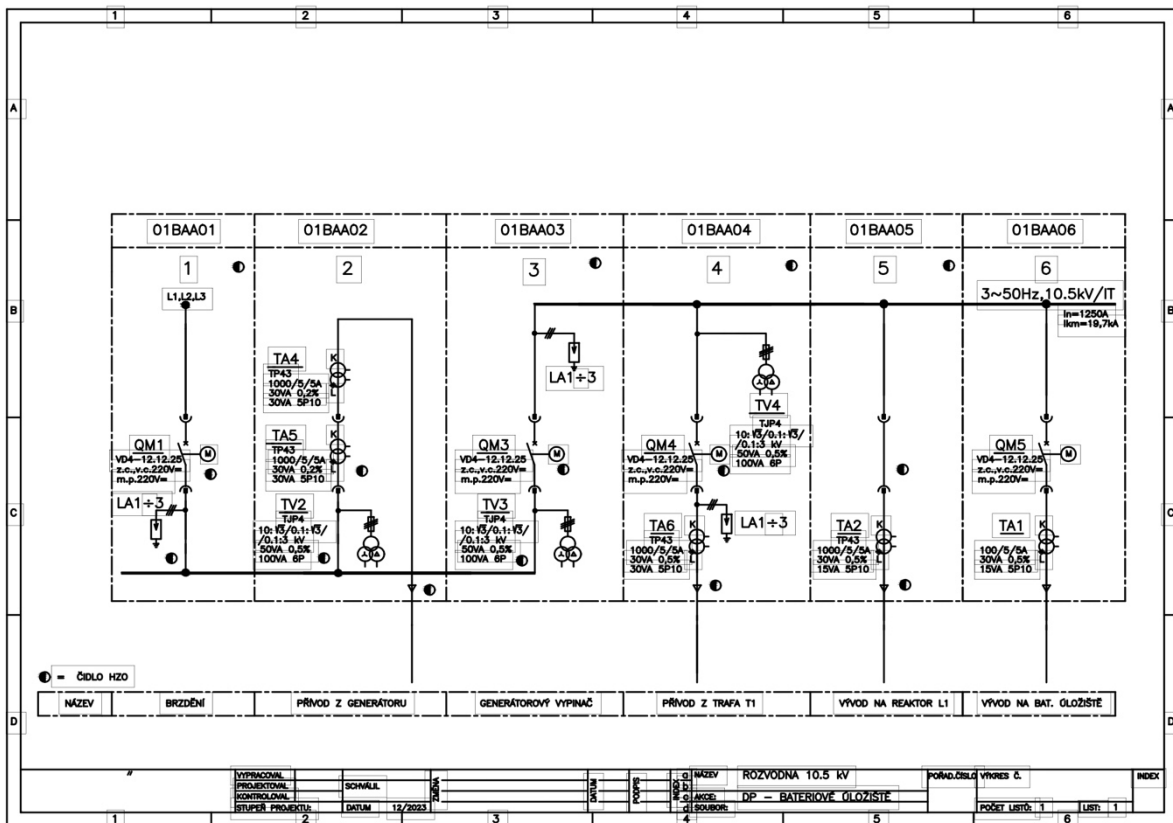
Proud I_1 je také důležitý pro dimenzování ochran, které jsou střídači předřazeny. A stejně tak vypočtené zkratové proudy (3.12), (3.13), (3.14).

Na základě těchto proudů byla navržena dvě možná zapojení do nově navrženého rozvaděče R1/R2 (viz Obr. 51, 52)⁷⁴. Prvním je zapojení, kde ochranu tvoří válcová pojistka, která byla vybrána dle I_1 na 80 A a odpínač QS1. Tento typ zapojení je možný za předpokladu, že baterie je v každodenním provozu. Druhé je zapojení, kde je sériově připojen vypínač QM5 (VD4 1212-25) na jmenovitý proud 1250 A (celá rozvodna je provozována na této hladině), zkratový proud 25 kA a měřicí transformátor proudu TA1 100/5/5 A.

⁷⁴ Schémata vychází z reálného zapojení rozvaděčů R1, R2, které bylo poskytnuto provozovatelem VE Štěchovice.



Obr. 51- Schéma zapojení rozvaděče R1 s pojistkou na vývodu baterie

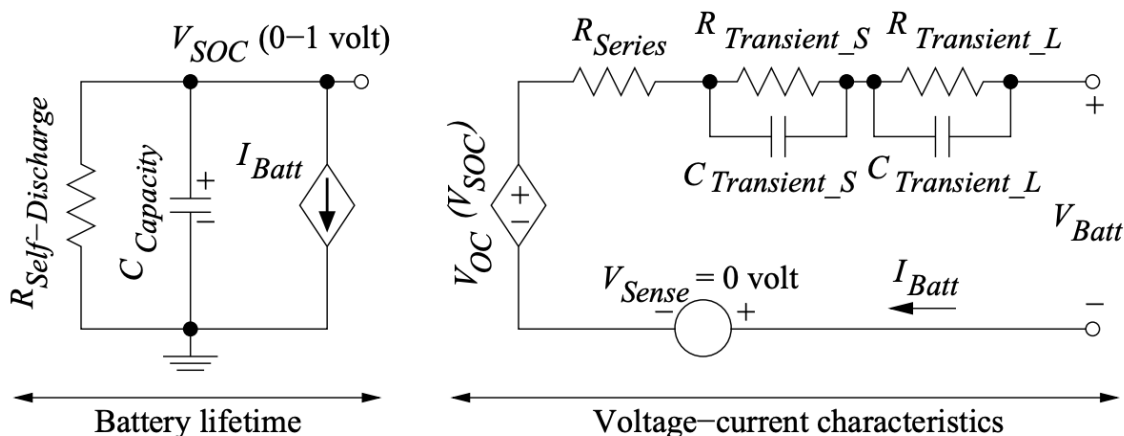


Obr. 52- Schéma zapojení rozvaděče R1 s proudovým transformátorem a vypínačem na vývodu baterie

3.7.2 Simulace nabíjení/vybíjení baterie

Od navrhované simulace je požadována zejména závislost velikosti napětí na čase, ze které lze následně odvodit dosaženou kapacitu baterie v určitém čase, a to zejména pro určení možné dodávky energie do sítě pro poskytování podpurných služeb ve stanoveném čase.

Náhradní obvod baterie pro simulaci je navržen následovně viz Obr. 53.



Obr. 51- Náhradní obvod pro simulaci

Obvod je složen ze dvou částí, část, která reprezentuje volt-ampérové charakteristiky baterie a část, která reprezentuje provoz baterie. Model kombinuje tranzientní schopnosti založené na Theveninově zapojení (sít' RC, která modeluje přechodovou odezvu), akční vlastnosti založené na impedanci a informace o době provozu (kondenzátor $C_{capacity}$ a řízený zdroj proudu, které modelují kapacitu, SOC a dobu chodu baterie). K přemostění SOC na napětí naprázdno se používá řízený zdroj napětí V_{soc} .

Využitelnou kapacitu lze modelovat pomocí kondenzátoru s plnou kapacitou $C_{capacity}$, samovybíjecího odporu ($R_{self-discharge}$) a ekvivalentního sériového odporu (součet R_{series} , $R_{transient_s}$ a $R_{transient_l}$). Plná kapacita kondenzátoru $C_{capacity}$ představuje celý náboj uložený v baterii, tj. SOC, přepočtem jmenovité kapacity baterie v Ah na náboj v Coulombech [C] je její hodnota definována jako:

$$C_{capacity} = 3600 * C_{bat} * f1(Cyklus) * f2(Teplota) [C] \quad (3.29)$$

kde,

- C_{bat} ... kapacita baterie [Ah],
- $f1$... faktor závislý na počtu cyklů,
- $f2$... faktor závislý na teplotě při provozu baterie [K].

Při modelování nebudu brát zřetel na počet cyklů a teplotu při provozu baterie, protože uvažuji ideální stav, kdy je baterie skladována za ideálních podmínek v kontejneru a počet cyklů je velmi nízký. Vzhledem k tomu, že simulace je prováděna v LTSpice, mohlo by zahrnutí těchto faktorů zkreslit výsledek. $C_{capacity}$ bude tedy určeno jen jako:

$$C_{capacity} = 3600 * C_{bat} [C] = 3600 * 1400 = 5\,040\,000 C \quad (3.30)$$

$C_{capacity}$ se nebude měnit se změnou proudu, což je pro plnou kapacitu baterie rozumné, protože energie se zachovává.

Změna využitelné kapacity v závislosti na proudu vychází z různých hodnot SOC na konci vybíjení pro různé proudy v důsledku různých úbytků napětí na vnitřním odporu (součet R_{series} , $R_{transient_s}$, $R_{transient_l}$) a stejného napětí na konci vybíjení). Při nabíjení nebo vybíjení baterie se k nabíjení nebo vybíjení používá řízený zdroj proudu I_{batt} .

Nastavením počátečního napětí V_{soc} rovného 1 V nebo 0 V se baterie inicializuje do plně nabitého nebo vybitého stavu. V_{soc} kvantitativně vyjadřuje SOC baterie.

Samovybíjecí odpor se používá k charakterizaci ztrát energie při samovybíjení v případě dlouhodobého skladování baterií. Prakticky jej lze zjednodušit jako velký odpor.

Napětí naprázdno (V_{oc}) se mění při různé úrovni kapacity, tj. SOC. Do modelu je důležité zahrnout nelineární vztah mezi napětím naprázdno a SOC. Proto se k vyjádření tohoto vztahu využívá napěťově řízený zdroj V_{oc} (V_{soc}). Napětí naprázdno je měřeno jako ustálené svorkové napětí naprázdno v různých bodech SOC. Skutečné napětí naprázdno lze zjistit pomocí dvou technik – extrapolací a průměrováním. Měření V_{oc} pro každý bod SOC však může trvat několik dní, proto byly naměřené hodnoty reálné Li-Ion baterie využité v LTSpice modelu převzaty⁷⁵.

Při skokovém zatěžovacím proudu reaguje napětí baterie pomalu. Proto je přechodová odezva charakterizována RC sítí. Síť se skládá z rezistoru R_{series} a dvou paralelních RC kombinací. R_{series} je zodpovědný za okamžitý úbytek napětí při krokové odezvě. Paralelní RC kombinace jsou zodpovědné za krátkodobé a dlouhodobé konstanty odezvy. Tyto dvě časové RC konstanty udržují chybu v rozmezí 1 mV pro všechna přizpůsobení křivek.

Teoreticky jsou všechny parametry v navrhovaném modelu funkcemi SOC, proudu, teploty a počtu cyklů. Výpočet potřebných parametrů vyplývá z výzkumu a provozu Li-Ion baterií, viz rovnice níže⁷⁶.

$$V_{OC}(SOC) = -1,031 * e^{-35 * SOC} + 3,685 + 0,02156 * SOC - 0,1178 * SOC^2 + 0,32012 * SOC^3 [V] \quad (3.31)$$

$$R_{Series}(SOC) = 0,1562 * e^{-24,37 * SOC} + 0,07446 [\Omega] \quad (3.32)$$

$$R_{Transient_s}(SOC) = 0,3208 * e^{-29,14 * SOC} + 0,04669 [\Omega] \quad (3.33)$$

$$C_{Transient_s}(SOC) = -752,9 * e^{-13,51 * SOC} + 703,6 [F] \quad (3.34)$$

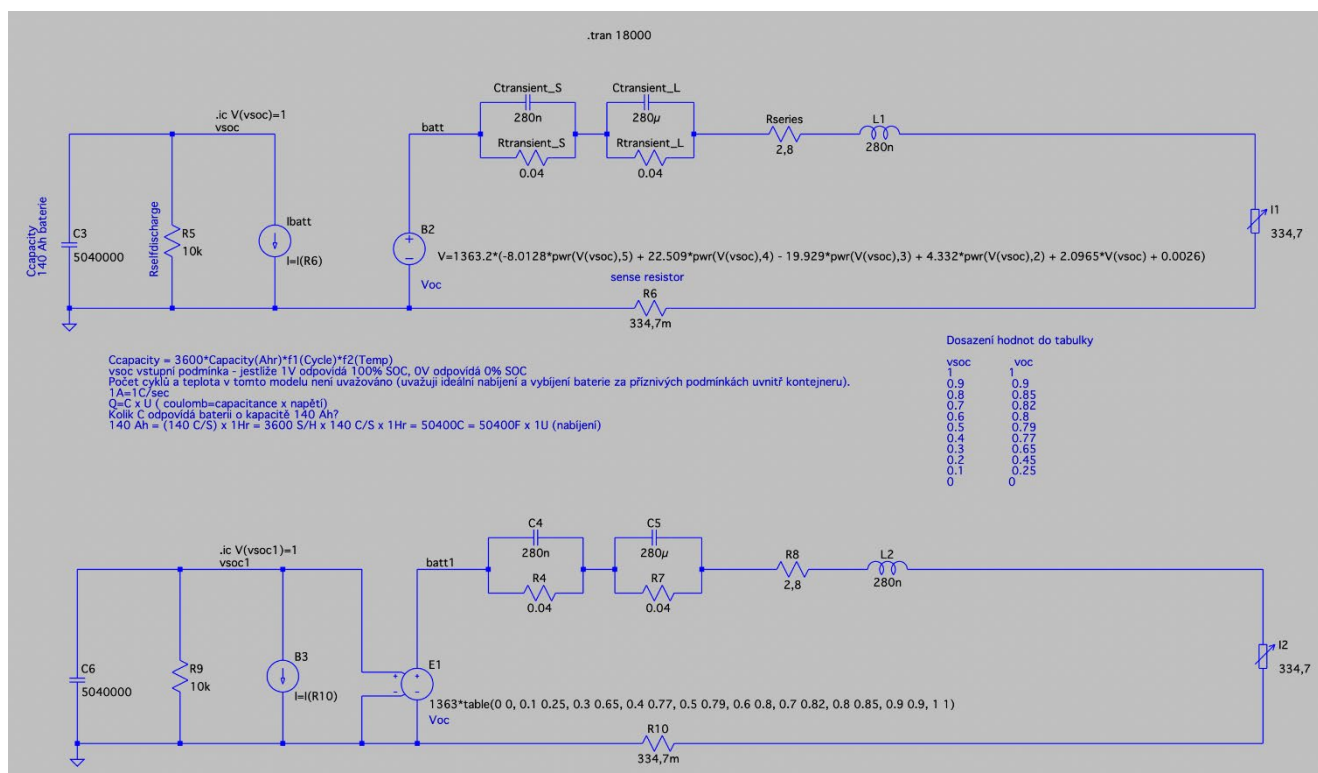
$$R_{Transient_L}(SOC) = 6,603 * e^{-155,2 * SOC} + 0,04984 [\Omega] \quad (3.35)$$

$$C_{Transient_L}(SOC) = -6056 * e^{-27,12 * SOC} + 4475 [F] \quad (3.36)$$

⁷⁵ [32] LI, An; PELISSIER, Serge; VENET, Pascal a GYAN, Philippe. Fast Characterization Method for Modeling Battery Relaxation Voltage. Online. In: *Batteries*. 2. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2313-0105/2/2/7>. [cit. 2024-01-02].

⁷⁶ [23] CHEN, Min a RINCÓN-MORA, Gabriel A. An Accurate Electrical Battery Model Capable of Predicting Runtime and I–V Performance. Online. In: *EEE Transactions on Energy Conversion*. 21. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/TEC.2006.874229>. [cit. 2024-01-02].

Na základě výše uvedených předpokladů byl vytvořen model v programu LTSpice.



Obr. 52- Schéma modelu v LTSpice

V modelu byla pro zachování nelineární závislosti napětí naprázdno V_{OC} a SOC využita rovnice (3.37).

$$V_{OC} = U_{nab/vyb} * (-8,0128 * V(vsoc)^5 + 22,509 * V(vsoc)^4 - 19,929 * V(vsoc)^3 + 4,332 * V(vsoc)^2 + 2,0965 * V(vsoc) + 0,0026) [V] \quad (3.37)$$

Kde,

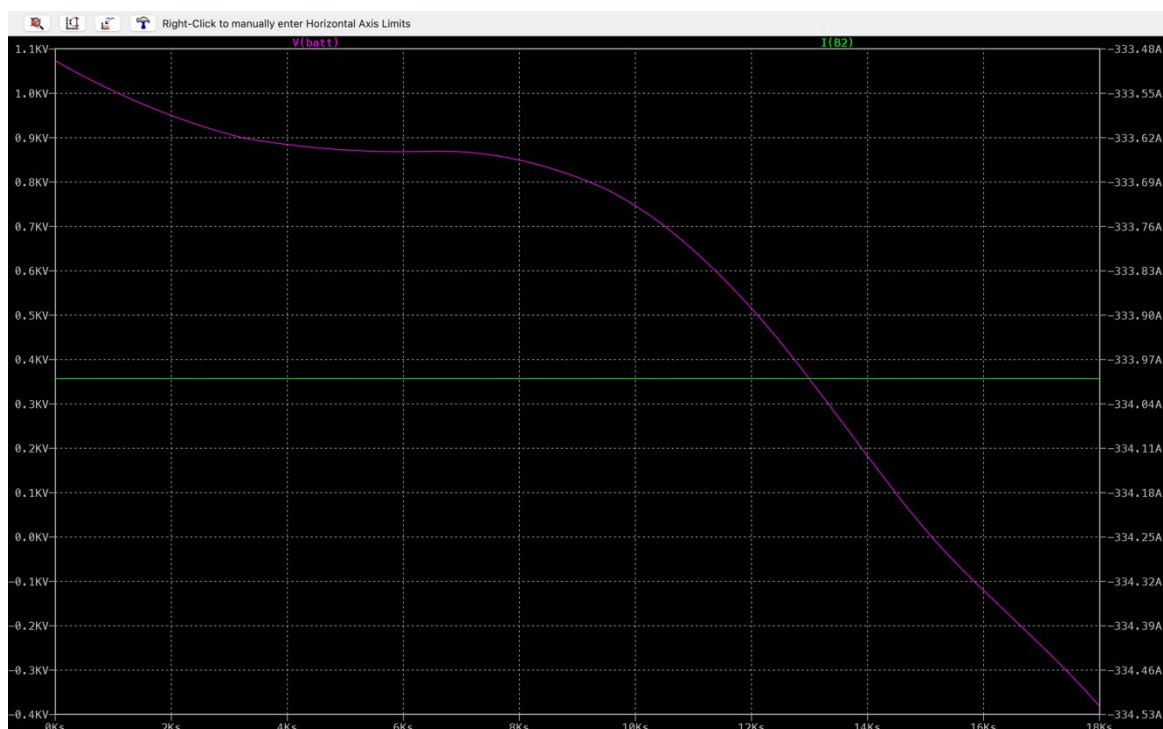
$U_{nab/vyb}$... zadávané nabíjecí/vybíjecí napětí dle datasheetu [V],
$V(vsoc)$... napětí, které modeluje stav nabití [V],
V_{OC}	... napětí baterie naprázdno [V].

Tato rovnice byla získána, jak již bylo výše uvedeno, experimentálním měřením⁷⁷.

Součástí schématu je i druhý (spodní) model, jehož průběhy odpovídají obecnému modelu. Liší se jen v zadávací tabulce, která vychází z rovnice (3.37) a je vytvořena dosazováním hodnoty od 0 do 1, které symbolizují stav nabití baterie.

Do modelu jsou dále přeneseny reálné hodnoty z datasheetu vybrané baterie, a to nabíjecí proud 0,5C, tedy 334,7 A (nastavitelný pomocí I1), nabíjecí napětí (1363,2 V) a vybíjecí napětí (1075,2 V). Ostatní hodnoty jsou vypočteny a dosazeny z výše uvedených rovnic.

⁷⁷ LI, An; PELISSIER, Serge; VENET, Pascal a GYAN, Philippe. Fast Characterization Method for Modeling Battery Relaxation Voltage. Online. In: *Batteries*. 2. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2313-0105/2/2/7>. [cit. 2024-01-02].



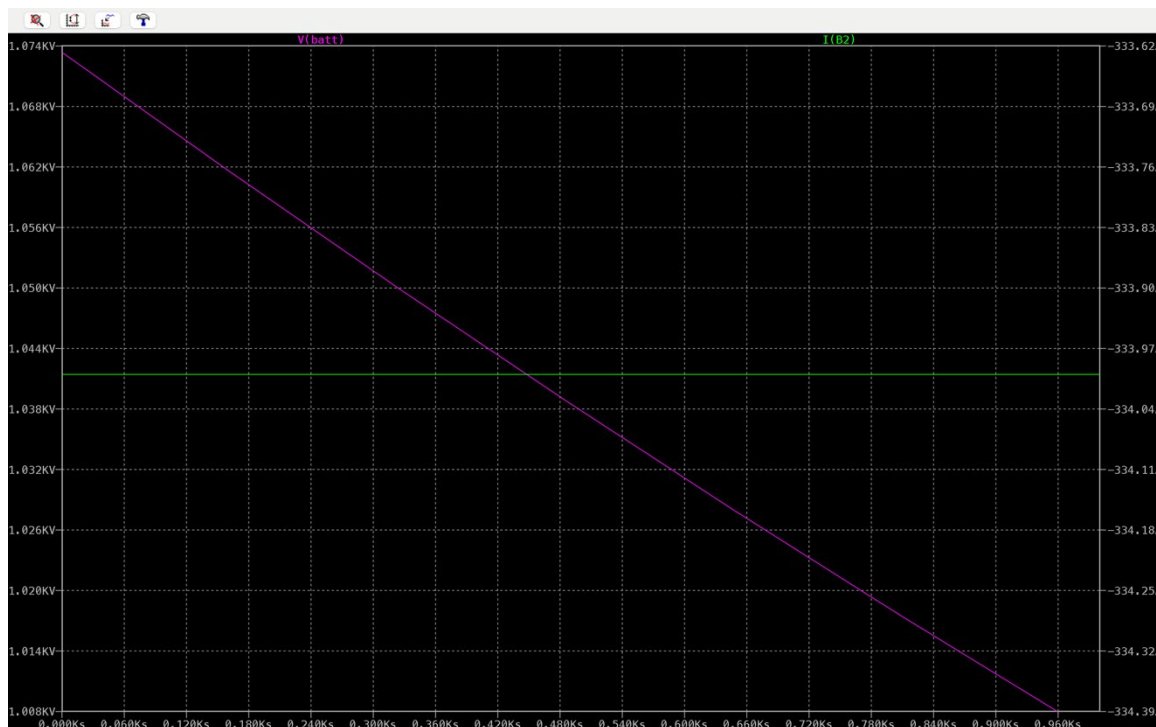
Obr. 53- Simulace vybíjení baterie

Na Obr. 55 je uveden graf ze simulace pro vybíjení baterie. Vybíjecí napětí činí 1075,2 V. Celková doba vybíjecího cyklu ze 100 % na 0 % činí zhruba 15 ks (4 hod 10 min). Řídicí systém baterie by však měl předcházet hlubokému vybití a ukončit proces vybíjení v 15 % kapacity baterie, což odpovídá 258 kWh. Této kapacity je dosaženo po 2 hod 41 min. Zbývajících 15 % do 0 % je vybíjeno delší dobu, a to 1 hod 29 min (dochází k omezování výkonu). Je patrné, že zhruba od 4 ks do 8 ks je vybíjecí napětí téměř konstantní a následně prudčeji klesá. Také lze sledovat, že zhruba prvních 15 % kapacity baterie (ze 100 % na 85 %) se vybíjí po dobu 1 hod 6 min, tedy rychleji než posledních 15 % do 0 %.

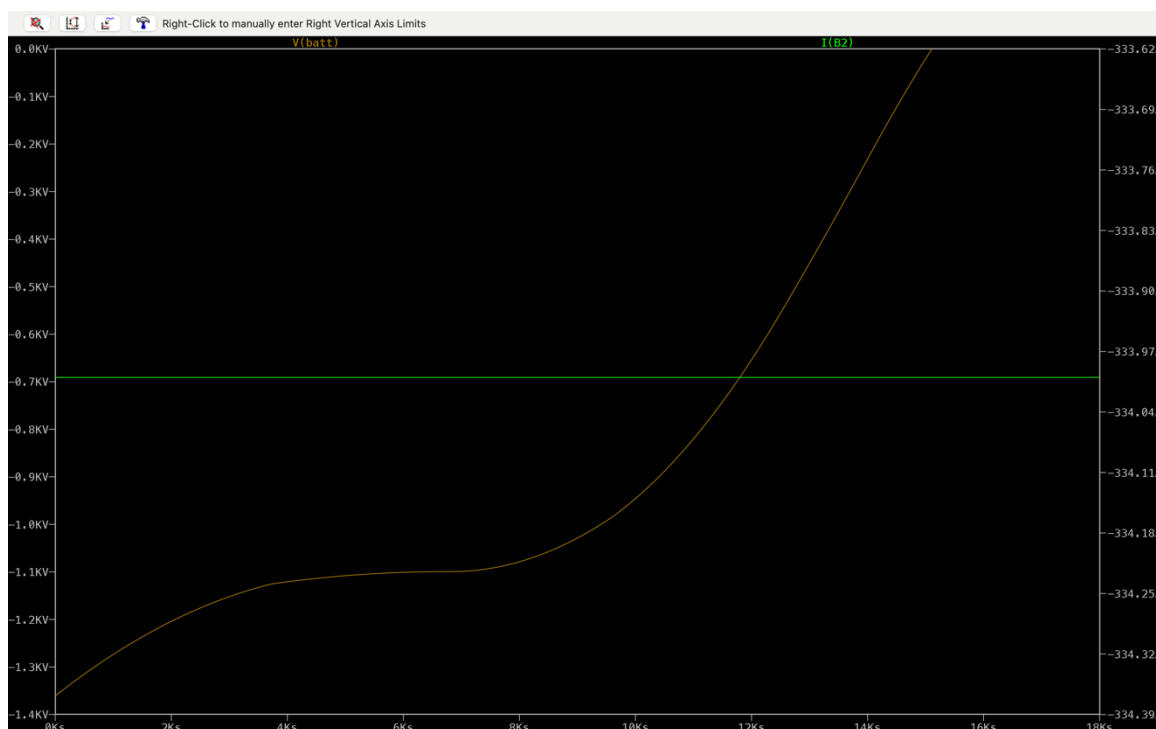
Díky tomuto grafu lze zjistit, kolik energie je baterie schopna dodat do sítě po aktivaci FCR, tj. od 30 s do 12,5 min vybíjení. Po přiblížení grafu v simulaci jsem zjistila, že po 30 s, kdy vybíjecí napětí poklesne o 3,8 V, je baterie o výkonu 1 MW schopna do sítě dodávat 1,27 kWh. Po 5 min (kdy dle Obr. 33 dochází k plné aktivaci aFRR) je pokles napětí 23,7 V, což odpovídá 7,93 kWh. Konečně po 12,5 min (kdy dochází k plné aktivaci mFRR) je pokles napětí 53,7 V, což odpovídá 17,97 kWh.

Při ekonomickém zhodnocení lze tedy počítat s poskytnutím 17,97 kWh pro službu FCR, či 16,7 kWh pro službu aFRR+.

Na Obr. 56 je uveden přiblížený graf, ze kterého byly odečítány výše zmíněná data.



Obr. 54- Přibližení simulace vybíjení



Obr. 55- Simulace nabíjení baterie

Na Obr. 57 je uveden graf simulace nabíjení baterie napětím o velikosti 1363,2 V. Jelikož však není žádané nabití do 100 % z provozních důvodů a v zájmu prodloužení životnosti baterie, je uvažováno nabití do 85 % (to odpovídá kapacitě 1462 kWh).

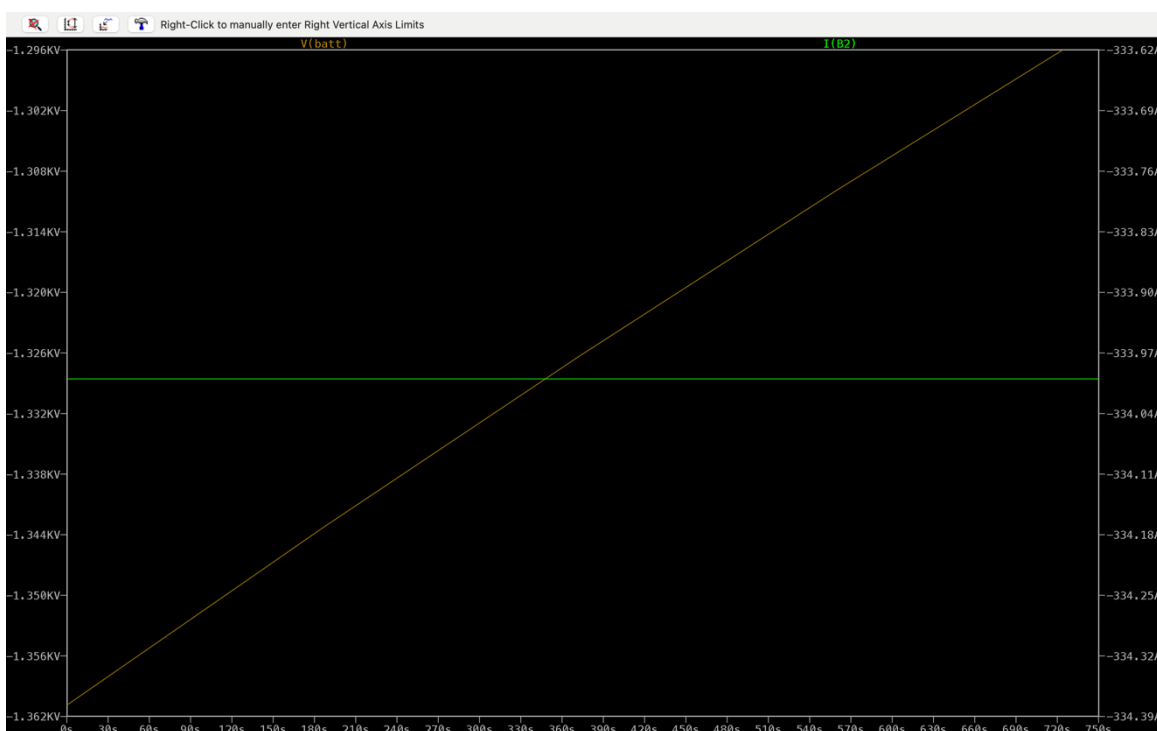
Celkový proces nabíjení od 0 % do 100 % trvá 15 ks (4 hod 12 min). Doba nabíjení a vybíjení je tedy přibližně stejná⁷⁸. Nabíjení z 0 % na 85 % trvá 11,88 ks (3 hod 18 min). Ideální situace je nabíjení z 15 % na 85 %. Obdobně jako u vybíjení i zde je patrná časová prodleva v prvních 4 ks nabíjení, což odpovídá 287 V, tj. 96 kWh.

I v případě nabíjení je možné odečíst data vhodná pro ekonomické zhodnocení.

Po 30 s je baterie nabita na 1,61 kWh s rozdílem napětí 4,8 V. Po 5 min je baterie nabita na 10 kWh s rozdílem napětí 29,9 V. Po 12,5 min je baterie nabita na 23,16 kWh s rozdílem napětí 69,2 V.

Při ekonomickém zhodnocení lze tedy počítat s poskytnutím 10 kWh pro službu FCR-, či 21,55 kWh pro službu aFRR-.

Na Obr. 58 je uveden přibližný graf, ze kterého byly odečítány výše zmíněná data.



Obr. 56- Přibližení simulace nabíjení

Po porovnání simulovaných průběhů nabíjení a vybíjení s reálnými průběhy (viz Obr. 36, 37) lze konstatovat, že simulace lze pokládat za dostačující, jelikož si grafy průběžně odpovídají. Z průběhů bylo také možno odečíst potřebná data pro vytvoření ekonomického modelu, kde budou hodnoty potřebné pro výpočet celkové ceny za poskytování podpůrné služby.

⁷⁸ Tady model naráží do rozporu s realitou, jelikož doba nabíjení by měla být delší. Současně si lze i povšimnout, že hodnoty na ose y grafu (Obr. 57) jsou otočeny. To je způsobeno tím, že ve zdrojích byly uvedeny experimentální data jen pro vybíjecí charakteristiku, nikoli pro nabíjecí. Lze tedy očekávat, že nabíjení bude poněkud zkreslené.

3.8 Návrh vyvedení výkonu z bateriového systému

3.8.1 Fyzické umístění baterie v elektrárně

Baterie by měla být z bezpečnostních důvodů umístěna mimo budovu elektrárny. Dle datasheetu vybrané baterie je nutno dodržet minimální vzdálenost kontejneru s bateriemi od jiné budovy či důležitých bodů, tato vzdálenost činí 10 m.

Na základě tohoto kritéria bylo v elektrárně nalezeno místo vedle skladu, viz Obr. 59 níže.



Obr. 57- Reálné umístění baterií v areálu elektrárny

Výkon z baterií bude vyveden silovým a datovým⁷⁹ kabelem zakopaným v zemi v kabelovém žlabu. Délka kabelu taženým venkem je 50 m. Kabelový svazek je možné vyvést do spodního patra přečerpávací elektrárny Štěchovice, kde bude dále napojen na kabelovou trasu, vedoucí do nultého podlaží středotlaké elektrárny. Z prvního podlaží je třeba kabely vést do nultého podlaží, kde se nachází rozvodny R1 a R2. Elektrárna Štěchovice je vybavena mohutnou kabelovou trasou, kde je dostatek místa na umístění dalšího kabelového svazku. Vedení kabelové trasy je zakresleno v poskytnutých půdorysech nultého a prvního podlaží středotlaké elektrárny viz Příloha 4.

Kabely jsou převážně vedeny po betonových kabelových rampách. Jen v případě datového kabelu, který vyústí společně se silovým kabelem v rozvodně R1 a R2, je nutno jej vyvést v ocelovém kabelovém žlabu po stěně do šachty vedoucí do dalšího mezipodlaží administrativní budovy, kde se nachází řídicí centrum elektrárny.

Celková délka silového kabelu činí 174 m⁸⁰ (50 m venkem + 20,3 m budovou přečerpávací elektrárny + 103,6 m budovou středotlaké elektrárny), celková délka datového kabelu činí 196 m (silový kabel + 19 m kabelovým žlabem rozvodnou po stěně + 3 m stoupání do dalšího podlaží šachtou).

⁷⁹ Datový kabel je třeba z kontejneru vést do řídicího centra elektrárny.

⁸⁰ Délka je odměřena z poskytnutých půdorysů v programu AutoCAD.

Vzhledem k faktu, že zvolené místo v elektrárně se nachází v záplavové oblasti, bude nutné toto riziko ošetřit zvýšením kontejneru ocelovou konstrukcí. Kontejnery lze skládat vedle sebe i na sebe.

3.8.2 Nalezení vhodného kabelu pro vyvedení výkonu

Maximální možný proud, který vystupuje z transformátoru T_{bat} a je na něj nutno kabel dimenzovat, je 60,49 A. Lze zvolit například kabel CYKY 3x6 RE⁸¹, jehož proudová zatížitelnost v zemi je 61 A a průměr 12,3 mm (průřezu $S_n = 118,82 \text{ mm}^2$)⁸². Jmenovité napětí 450–750 V, měrný odpor 3,133 Ω/km . Kabely CYKY jsou vhodné pro ukládání do země v kabelových žlabech.

Také je nutné provést kontrolu na tepelné účinky zkratového proudu pomocí určení minimálního celkového průřezu S_{min} a porovnat jej s průřezem vybraného kabelu. S_{min} výpočtu ze vztahu:

$$S_{min} = \frac{I_{ke} * \sqrt{t_k}}{K} = \frac{12,18 * 10^3 * \sqrt{0,2}}{112} = 48,63 \text{ mm}^2 \quad (3.29)$$

kde,

- I_{ke} ... ekvivalentní oteplovací proud v rozvodně 10,5 kV [kA],
- t_k ... doba trvání zkratu, kterou uvažují rovnu 0,2 s [s],
- K ... materiálová konstanta, určená z normy ČSN 38 1754⁸³ [-].

Po porovnání S_{min} a S_n je patrné, že $S_{min} < S_{vybraný}$ a tudíž vybraný kabel CYKY 3x6 RE může být použit pro vyvedení výkonu z baterie do rozvodny R1 (R2) 10,5 kV.

Dále je třeba vypočítat úbytek napětí (U_a) na kabelu:

$$U_a = I_1 * l * R = 60,49 * 174 * 3,133 * 10^{-3} = 32,98 \text{ V} \quad (3.30)$$

kde,

- I_1 ... proud přenášený kabelem [A],
- l ... délka kabelu [m],
- R ... odpor kabelu [Ω].

Úbytek napětí odpovídá zhruba 0,3 % napětí zdroje 10,5 kV, tudíž je z pohledu úbytku napětí, jehož maximální povolená hodnota činí 10 % zdrojového napětí, optimální.

⁸¹ Re odkazuje na kruhové jednodrátové jádro, což je vhodné pro malé a střední průřezy kabelů pro pevné uložení.

⁸² [42] PRAKAB. *Instalační kabely CYKY*. Online. 2023. Dostupné z: <https://www.prakab.cz/upload/products/CYKY.pdf>. [cit. 2023-12-16].

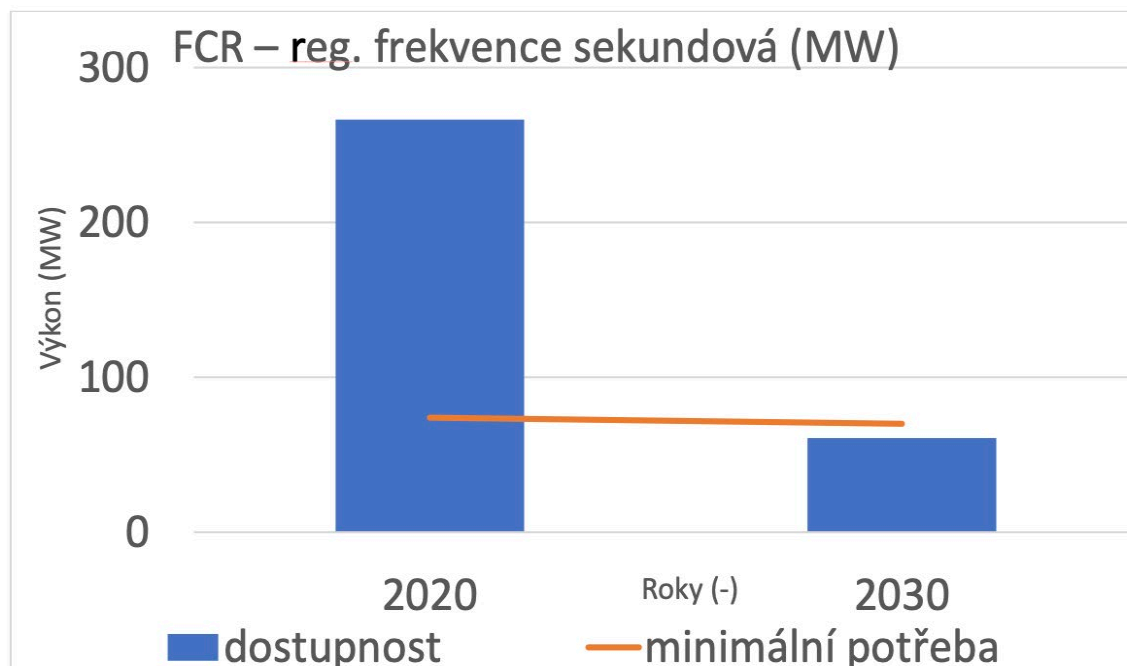
⁸³ ČSN 38 1754, *Dimenzování elektrického zařízení podle účinku zkratových proudů*. Praha, 1976.

4 Ekonomické zhodnocení

4.1 Ceny za poskytování podpůrných služeb

Evropské společenství se na základě měnící se energetické politiky rozhodla zavést platformy pro nakupování a poskytování podpůrných služeb. Jedná se o platformy pro nákup regulačních záloh, konkrétně o platformy FCRC a ALPACA. FCRC je platforma pro společný nákup FCR a vstoupila do provozu počátkem března 2023. Jsou do ní zapojeny především státy západní Evropy a Česká republika. ALPACA by měla být uvedena do provozu v roce 2024, jedná se o platformu pro nákup aFRR⁸⁴.

Náklady na SVR historicky klesaly díky zvyšující se konkurenci na trhu, nicméně v posledních letech došlo ke zvýšení těchto cen z důvodů pandemie Covid-19 a plánům na dekarbonizaci EU, viz prognóza⁸⁵ Obr. 60. Dle prognózy je patrné, že poskytovatelů služby FCR bude v budoucnu ubývat a je možné očekávat narůst cen za její poskytování, eskalace těchto cen může dosáhnout až 10 %. Ceny za poskytování SVR se odvíjejí tedy podle cen na denním trhu, na německých stránkách⁸⁶ lze dohledat tato data a odvodit tak ceny pro poskytování FCR a jiných služeb, viz Tabulka 12. Dále jsou v tabulce uvedeny i ceny v případě výběrového řízení, které jsou stanoveny neméně na určené období a nemění se tedy hodinově na základě denního trhu.



Obr. 58- Predikce vývoje potřeby služby FCR

Parametr	Průměrná hodnota
Cena za poskytování aFRR+ na DT	125 CZK/MWh
Cena za poskytování aFRR- na DT	188 CZK/MWh

⁸⁴ [48] STRIAL, Štěpán. *Zajišťování systémových služeb*. Online, ČEPS, a.s., 2021 [cit. 2023-12-16]. Dostupné z: Moodle FEL.

⁸⁵ [26] KAŠÁK, Martin. *Výzvy provozovatele přenosové soustavy* [online]. ČEPS, a.s., 2022 [cit. 2023-12-16]. Dostupné z: <https://moodle.fel.cvut.cz/course/view.php?id=6905>

⁸⁶ [18] *FCR Capacity market R1* [online]. Regelleistung.net, 2023 [cit. 2023-12-16]. Dostupné z: [https://www.regelleistung.net/apps/datacenter/tenders/?productTypes=SRL,MRL&markets=BALANCING_CAPACITY,BALANCING_ENERGY&date=2023-12-16&tenderTab=SRL\\$CAPACITY\\$1](https://www.regelleistung.net/apps/datacenter/tenders/?productTypes=SRL,MRL&markets=BALANCING_CAPACITY,BALANCING_ENERGY&date=2023-12-16&tenderTab=SRL$CAPACITY$1)

Parametr	Průměrná hodnota
Cena za poskytování FCR na DT	1033 CZK/MWh
Cena za poskytování aFRR+ VŘ	3611 CZK/MWh
Cena za poskytování aFRR – VŘ	509,11 CZK/MWh
Cena za poskytování FCR VŘ	3800 CZK/MWh

Tabulka 12- Průměrné ceny za poskytování SVR pro rok 2022

4.2 Diskont, eskalace

V tomto přístupu ekonomického zhodnocení investice diskont reprezentuje cenu za jinou příležitost, což je v tomto případě například renovace stávající elektrárny, zavedení jiného typu akumulace, modernizace, navýšení výkonu, vložení peněz na spořicí účet a pozdější realizace jiného projektu (např. fotovoltaická pole na hladině). Diskontní sazba je tedy určena na základě nákladů na cizí kapitál ve výši 5 %.

Všechny ceny kromě cen za energii a inovativní technologie eskalují podle inflace. Inflaci jsem určila pomocí přírůstků z minulých 12 let a faktu, že je snaha o dodržování inflace mezi 2–3 %, jako 3,14 %.

Meziroční inflace [%]	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
	2,4	2,4	1,4	0,1	0,1	2,0	2,4	2,0	3,2	2,3	6,6	9,9	7,3

Tabulka 13- Meziroční bilance inflace od roku 2011 do roku 2023

Eskalace cen za poskytování SVR byla určena na 10 % (odvozeno viz výše).

Eskalace cen za elektřinu jsem určila podle meziročních změn z minulých 12 let pomocí geometrického průměru na 3,73 %, viz Tabulka 14 níže.

Meziroční nárůst cen elektřiny [%]	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
	100	103	89	97	97	100	111	103	98	155	97

Tabulka 14- Meziroční bilance cen elektřiny od roku 2012 do roku 2024

Eskalace cen za revize odpovídá eskalaci podle inflace, tedy 3,14 %.

4.3 Výnosnost investice

Výnosnost investice lze posuzovat z několika pohledů. V tomto ekonomickém zhodnocení budou jednotlivé varianty porovnávány na základě NPV (Net Present Value, čistá současná hodnota). NPV je suma diskontovaných hodnot všech peněžních toků spojených s investicí. To znamená, že nejprve se musí stanovit hodnota každého jednotlivého peněžního toku a poté je přepočítat (diskontovat) pomocí přijaté diskontní sazby pro danou investici. NPV říká, kolik peněz by realizace dané investice přinesla firmě. Pokud je NPV kladné, projekt je vhodný k realizaci. Naopak, pokud je hodnota záporná, projekt není vhodný z hlediska návratnosti investice (avšak i při záporné NPV můžeme investici provést). Výpočet NPV viz níže:

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t} [Kč] \quad (4.1)$$

kde,

CF ... peněžní tok (Cash Flow) v daném roce [Kč],
 r ... výše diskontu [%],
 t ... rok v pořadí [-].

4.4 Ekonomické vstupy

Dle konkrétního návrhu instalace lze určit celkové investiční náklady. Primárně se budou skládat z ceny za bateriový kontejner, kabelové vedení, stavební práce, rozvaděč a revize.

Celková cena za kabelové vedení pro jeden bateriový systém činí 25 902 Kč (174 m silového kabelu CYKY 3x6 RE s cenou 71 Kč za metr + 196 m datového kabelu s cenou 18 Kč za metr + 50 m kabelový žlab podzemní betonový s cenou 168 Kč za metr, 18 m kabelový žlab ocelový Merkur s cenou 90 Kč za metr).

Cena bateriového kontejneru (dle datasheetu) včetně veškeré technologie, dopravy a instalace činí 23 000 000 Kč (přepočet z USD kurzem 1 USD = 22,6 Kč). Dále bude třeba přidat protipovodňovou bezpečnostní konstrukci, jejíž cenu odhaduji na 100 000 Kč.

Rozvaděč (nabídka viz Příloha 5) firmy ABB UniGear type ZS1 v možnosti s pojistkou za 5 072 000 Kč, v možnosti s vypínačem za 5 166 900 Kč. Další možností je zanechat dosavadní rozvaděč R1/R2 a instalovat jen skříň pro baterii o šířce 80 cm. V tomto případě by samostatná skříň vyšla na 800 000 Kč. Ovšem lze předpokládat vyšší ceny za revize a opravy díky napojení na stávající, zastaralé rozvaděče (uvažuji o 30 % vyšší).

Úvodní stavební práce, které zahrnují přípravu vybraného místa na instalaci kontejneru, zapojení nového rozvaděče, vykopání kabelové cesty a položení kabelových žlabů, zkoušky, nastavení ochran a řízení. Stavební práce byly stanoveny na 500 000 Kč.

Po průzkumu trhu a prohledání jednotlivých služeb byla cena za revizi baterie stanovena na 5000 Kč/rok. Cena na údržbu je zhruba 1000 Kč/měsíc, tj. 12000 Kč/rok. Cena za údržbu zahrnuje pracovníka, jehož úkolem je úklid a správa okolí kontejneru.

Položka	Cena [Kč]
Kabelové trasy	25 902
Bateriový kontejner + konstrukce	23 100 000
Stavební práce	500 000
Rozvaděč varianta s pojistkou	5 072 000
Rozvaděč varianta s vypínačem	5 166 900
Rozvaděčová skříň	800 000
Celkem (s variantou s pojistkou)	28 697 902
Celkem (s variantou s vypínačem)	28 792 802
Celkem (s variantou se skříní)	24 425 902

Tabulka 15- Přehled cen celkem (pro 1 kontejner)

Jelikož je životnost baterie 5000 cyklů, tj. 14 let, bude nutné provést reinvestici baterie v 15. roce doby hodnocení. Cena reinvestice (zejména střídač) je dle datasheetu k baterii stanovena na 30 % celkové ceny, tj. 6 930 000 Kč.

Financování je uvažováno z vlastního kapitálu.

Dotace nejsou v primárním investičním zhodnocení uvažovány, jelikož jsou vypláceny zpětně.

Cena za nakupovanou elektřinu pro napájení vlastní spotřeby činí 2,5 Kč/kWh. Cena za elektřinu pro nabíjení baterie v době nadbytku energie v síti může být dle zadavatele i záporná, budu tedy uvažovat cenu 1 Kč/kWh⁸⁷.

4.5 Přehled variant

V tomto ekonomickém zhodnocení se nabízí několik variant.

- Varianta 1 – koupě jednoho bateriového kontejneru v provedení s novým rozvaděčem. Baterie by byla primárně nabíjena z přebytků výroby elektrárny + levnou energii ze sítě. Baterie by byla vybíjena v případě potřeby dodávky do sítě pro poskytování FCR, potažmo aFRR. **Celková cena je cca 29 000 000 Kč.**
- Varianta 2 – stejně jako Varianta 1 s tím rozdílem, že by byly pořízeny dva bateriové kontejnery. **Celková cena je cca 58 000 000 Kč.**
- Varianta 3 – koupě jednoho bateriového kontejneru v provedení pouze se skříní. **Celková cena je cca 24 500 000 Kč.**
- Varianta 4 – koupě dvou bateriových kontejnerů v provedení pouze se skříní. **Celková cena je cca 49 000 000 Kč.**

Všechny varianty byly posouzeny dle NPV (Excel viz Příloha 6). V tabulce a grafu níže jsou uvedeny výsledné hodnoty.

Varianta	NPV [Kč]
Varianta 1 (aFRR)	-43 734 998,22
Varianta 1 (FCR)	-43 734 761,37
Varianta 2 (aFRR)	-87 469 996,43
Varianta 2 (FCR)	-87 469 522,75
Varianta 3 (aFRR)	-42 101 398,82
Varianta 3 (FCR)	-42 101 161,98
Varianta 4 (aFRR)	-84 202 797,64
Varianta 4 (FCR)	-84 202 323,96

Tabulka 16- Posouzení variant dle NPV

Z tabulky i grafu je následně patrné, že investice do bateriového uložení není ekonomicky výnosná, jelikož jsou všechna NPV záporná. Toto však bylo očekávatelné, jelikož možnost příjmu z provozu baterie je momentálně velmi nízká. V budoucnu lze očekávat, že se tato skutečnost změní a provoz akumulčních zařízení pro podporu sítě bude ekonomicky efektivnější.

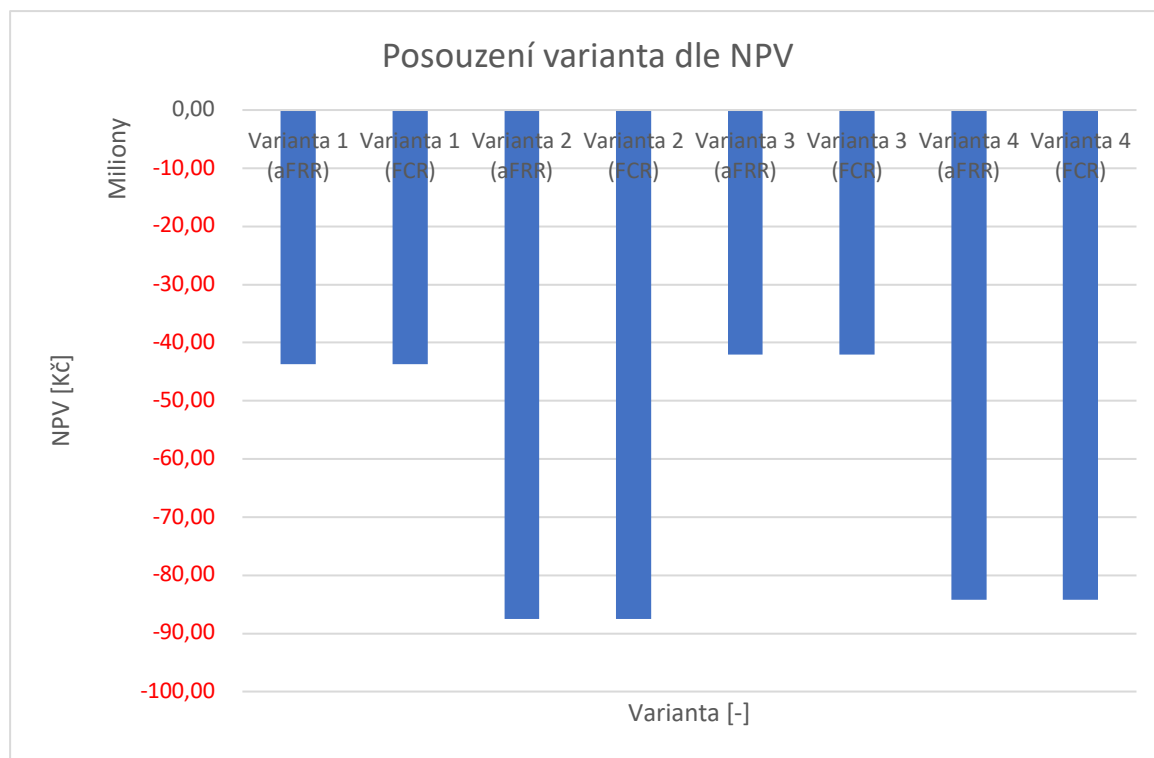
„Nejvýhodněji“ tedy vychází varianta s nejnižší počáteční investicí, tedy Varianta 3 (FCR). Místo investice do celého nového rozvaděče by byla pořízena pouze skříň pro baterii. Dále by byla instalována jen jedna baterie, která by poskytovala energii pro službu FCR (cena za FCR byla brána pro výběrové řízení, jelikož je dle odečtených hodnot vyšší než na denním trhu).

Dále je nutno podotknout, že tento ekonomický model uvažuje ideální stav, kdy je veškerá kapacita baterie nabíjena z generátoru a neodebírání tak pro nabíjení žádnou energii ze sítě. Ačkoliv tento stav může v elektrárně nastat velmi často, lze se setkat i se stavem, kdy

⁸⁷ Tyto informace byli předány od provozovatele VE Štěchovice.

je generátor ve stavu údržby, nebo když je veškerou vyrobenou energii nutno dodat do sítě, v těchto případech by baterie musela být napájena ze sítě.

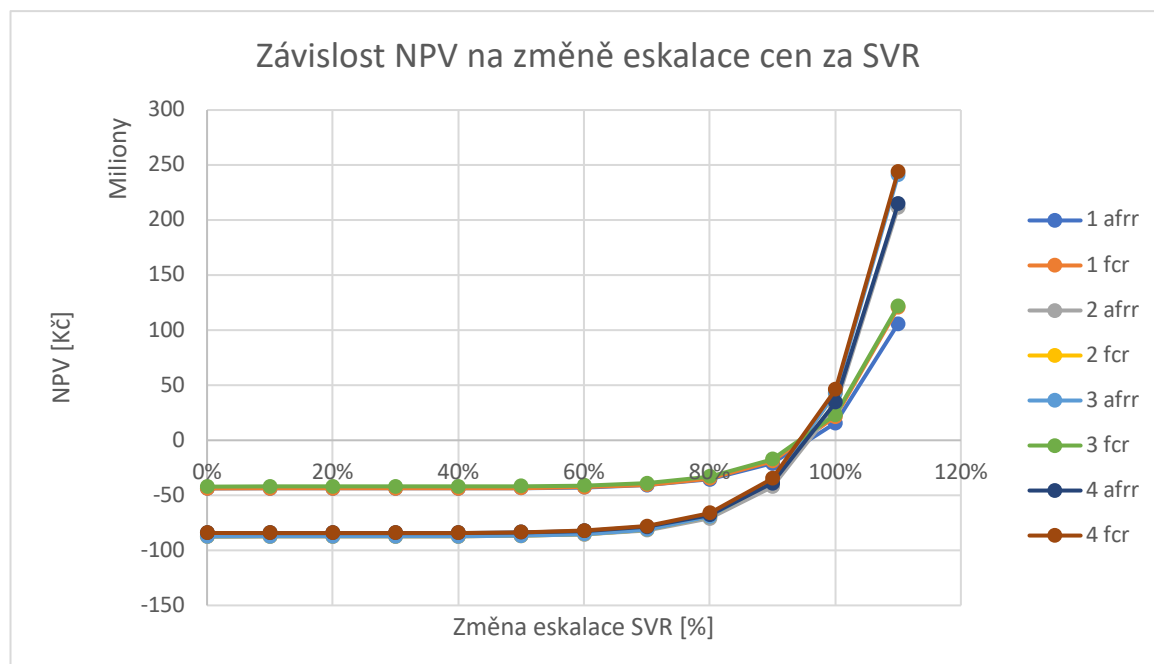
Dále je v ekonomickém zhodnocení uvažováno, že veškerá energie nabízená na poskytování služeb SVR bude využita.



Obr. 59- Grafické posouzení NPV variant

4.5.1 Citlivostní analýzy

Nejprve jsem vytvořila citlivostní analýzu závislosti NPV na změně cen za poskytování SVR. Viz Obr. 62.

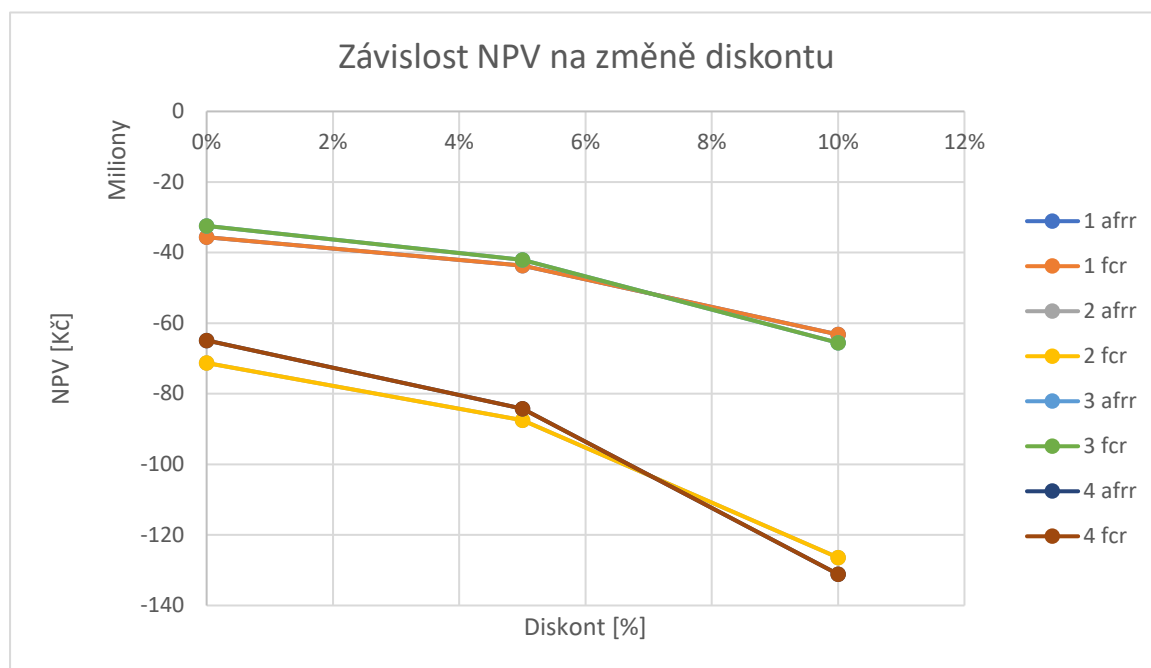


Obr. 60- Citlivostní analýza - závislost NPV na změně eskalace cen za SVR

Z výsledků citlivostní analýzy je patrné, že investice by byla výnosná (NPV by bylo kladné) v případě, kdy by eskalace cen za poskytování SVR stoupla nad 90 %. To by znamenalo, že ceny za jednotlivé služby by musely vypadat následovně (Tabulka 17). Je zřejmé, že v případě takovéto eskalace cen za SVR by byla nejvýhodnější Varianta 4 (FCR), tedy možnost se dvěma připojenými bateriemi, které poskytují službu FCR.

Parametr	Cena po eskalaci 90 % po 1. roce
Cena za poskytování aFRR+ VŘ	6860,9 CZK/MWh
Cena za poskytování aFRR – VŘ	967,309 CZK/MWh
Cena za poskytování FCR VŘ	7220 CZK/MWh

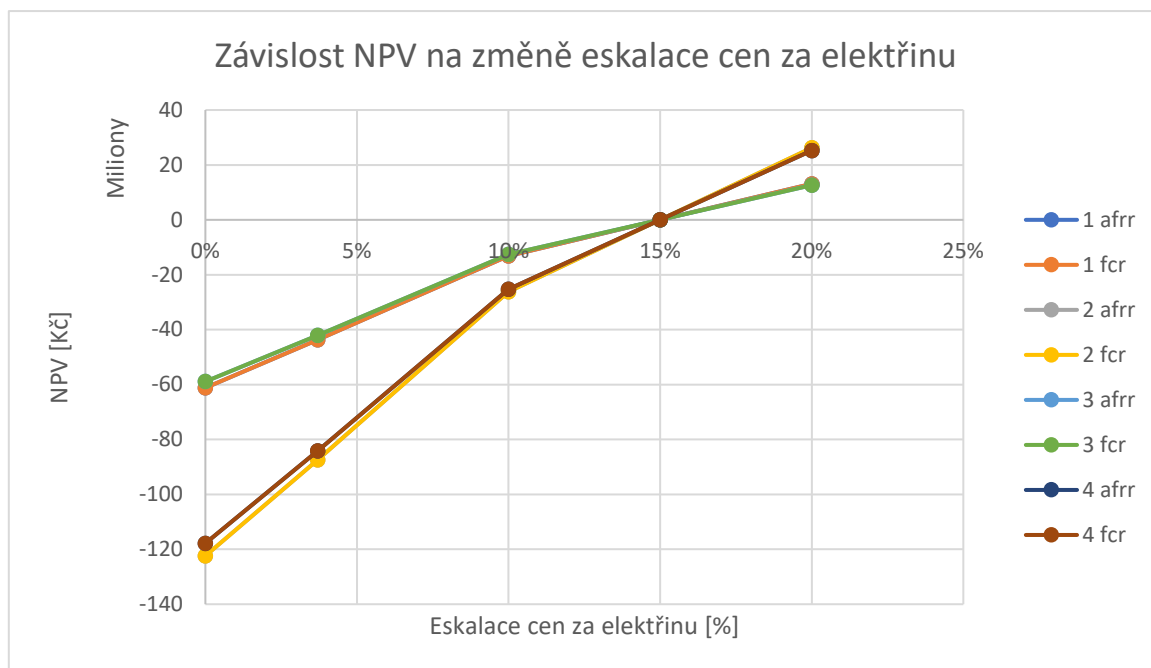
Tabulka 17- Změna cen za poskytování SVR po eskalaci 90 % po 1. roce



Obr. 61- Citlivostní analýza - závislost NPV na změně diskontu (některé průběhy se překrývají)

Na Obr. 63 je citlivostní analýza závislosti NPV na změně diskontu. Je zřejmé, že při zvyšujícím se diskontu se NPV ještě více zmenšuje (stává zápornější). Vyšší diskontní sazba snižuje NPV, protože budoucí toky jsou nyní hodnoceny méně výrazně ve srovnání se současností, tzn. že vyšší diskontní sazba může zvýšit vnímané riziko investice. Celkově vyšší diskontní sazba znamená, že budoucí peněžní toky ztrácejí na hodnotě a jsou méně výhodné ve srovnání se současnými peněžními toky.

Na Obr. 64 je citlivostní analýza závislosti NPV na změně eskalace cen za elektřinu. Z grafu je patrné, že meziroční eskalace by musela dosahovat minimálně zhruba 15 %, aby bylo NPV = 0 Kč. Momentálně je v modelu uvažována cena za odebranou elektřinu ze sítě 2,5 Kč/kWh. Toto je speciální tarifní cena jen pro elektrárnu, jelikož není potřeba platit žádné poplatky za přenos a patří pod ČEZ, a.s. Tato energie je využita pro pokrytí vlastní spotřeby a na chod dispečerského centra. Nicméně baterie je schopna tuto vlastní spotřebu z nějaké části pokrýt. Na základě eskalace 15 % by musela být cena elektřiny po prvním roce v tomto tarifu 2,9 Kč/kWh. Pokud se vrátím zpět na Tabulku 14 (Meziroční bilance cen elektřiny) meziroční eskalace 15 % není nereálná. Například meziroční růst cen elektřiny mezi lety 2020 a 2021 činil 57 %, ačkoliv se jednalo o extrémní situaci (pandemie COVID-19).



Obr. 62- Citlivostní analýza - závislost NPV na změně eskalace cen za elektřinu (některé průběhy se překrývají)

Obecně je z citlivostních analýz patrné, že tato investice může být výnosná, jen za jiných podmínek. Z provedených analýz lze shrnout, že eskalace cen za poskytování SVR by musela vzrůst nad 90 %, eskalace cen za elektřinu by musela vzrůst minimálně na 15 % a volba diskontu je stěžejní pro hodnocení investic.

5 Závěr

Diplomová práce obsahuje několik kapitol, které jsou logicky řazeny dle postupu návrhu a zadání. Na počátku se autorka práce věnuje teoretickému rozboru, který obsahuje stručné představení technologie vodních elektráren (zejména průtočných a přečerpávacích), výčet akumulčních technologií, příklady implementace bateriových uložišť, jejich možné využití a s nimi spojená legislativa, představení vodní elektrárny Štěchovice. Dále následuje kapitola praktického návrhu uložišť, kde autor krok po kroku postupuje od rozboru přípojného místa po výběr samotného uložišť a vyvedení výkonu pomocí kabelových tras. Součástí této kapitoly je i jednoduchá simulace v programu LTSpice, která slouží pro lepší představu provozu baterie. Autorka práci končí ekonomickým zhodnocením, kde porovnává různé varianty instalace a výnosnost celé investice. Následuje již jen konečná část, kde autor práci zhodnocuje jako celek a uvádí poslední doporučení.

V teoretické části autorka čtenáře nejprve seznamuje s rozdělením vodních elektráren, následuje úvodní představení některých akumulčních systémů s důrazem na bateriová uložišť. Z této části si čtenář mimo jiné může odnést poznatky o problémech s legislativou, které jsou s implementací bateriových uložišť spjaty, jejich ekologickou likvidací a využití v přenosové a distribuční soustavě. Autorka se zabývá především službami SVR (služby systémové regulace), pro jejichž poskytování jsou bateriové systémy vhodné. Teoretická část je obohacena o zavádění tzv. smartgrids v podobě mikrosítí a virtuálních elektráren ve spolupráci s akumulací.

Po krátkém představení VE Štěchovice následuje praktický návrh bateriového uložišť. Na úvod této kapitoly je uveden přehled pro obecný návrh baterie. V první řadě musela autorka specifikovat možnosti využití baterie v elektrárně. Bateriové uložišť bude sloužit pro poskytování služeb systémové regulace (FCR, aFRR+, aFRR-) a částečné napájení vlastní spotřeby. Nabíjeno bude primárně nadbytečnou energií vyrobenou v elektrárně, případně ze sítě. Na základě této specifikace mohla být vypočítána potřebná kapacita. Dle jednopólového schématu elektrárny autorka zjistila možná omezení, která musí návrh zahrnovat a navrhla několik možností pro budoucí úpravu. Limitující je zejména výkon baterie, který musí být kompatibilní s blokovým transformátorem. Výkon uložišť může být maximálně 1 MW. Kapacita byla určena na základě potřeby pro poskytování SVR (0,5 MW) a pokrytí minimální vlastní spotřeby pro případný start ze tmy (720 kWh). Ve výsledku tedy autorka hledala konkrétní uložišť o výkonu 1 MW a minimální kapacitě 1,22 MWh. Nalezené uložišť Megatron 1 MW o kapacitě 1720 kWh firmy Symtech Solar těmto podmínkám odpovídá. Následně autorka provedla výpočty zkratových poměrů a maximálního proudu pro návrh zapojení tohoto uložišť do jednopólového schématu. Dalším limitujícím faktorem tohoto návrhu byl fakt, že v rozvaděčích, kam autorka plánuje uložišť zapojit, nejsou volné skříně. Na toto konto autorka provedla návrh dvou nových rozvaděčů, které jsou rozšířené o jednu skřín a nahradily by stávající, zastaralé. V jednom návrhu je obsažen rozvaděč s pojistkou, v druhém je obsažen rozvaděč s vypínačem. Autorka vybrala konkrétní rozvaděče od firmy ABB. V předposlední kapitole autorka představuje simulační model v LTSpice, který je v podstatě založen na náhradním obvodu bateriového článku. Model simuluje závislost napětí na čase při nabíjení/vybíjení, z čehož lze získat i kapacitu v určitém čase. Výsledné hodnoty byly využity ve výpočtech ekonomického modelu. V poslední kapitole praktického návrhu autorka provedla návrh vyvedení výkonu z kontejneru do rozvodny. Kabelové vedení bude provedeno silovým kabelem CYKY 3x6 RE o délce 174 m a datovým kabelem o délce 196 m. Nové kabelové trasy autorka zakreslila do poskytnutého půdorysu elektrárny.

Autorka práci zakončuje stručným ekonomickým hodnocením, kde se čtenář může dozvědět výši počáteční investice, stanovenou cenu za revize a opravy a zvolené hodnoty eskalace a diskontu. Autorka se investicí rozhodl hodnotit na základě kritéria NPV. V ekonomickém zhodnocení jsou uvedeny 4 varianty, které jsou následně podle uvedeného kritéria hodnoceny. Varianta 1 odpovídá koupi jednoho kontejneru a nového rozvaděče, Varianta 2 odpovídá koupi dvou kontejnerů a nového rozvaděče, Varianta 3 odpovídá koupi jednoho kontejneru a rozvaděčové skříně a Varianta 4 odpovídá koupit dvou kontejnerů a rozvaděčové skříně. Všechny varianty byly na základě NPV vyhodnoceny jako nevýnosné, což ale neznamená, že investice není realizovatelná. Jelikož hlavním požadavkem pro provozovatele VE Štěchovice je spolehlivost této technologie jakožto záložního zdroje a možnost obohacení přečerpávací elektrárny Štěchovice II o další, rychleji nabíhající, nástroj pro poskytování podpůrných služeb. Ekonomická část projektu tedy pro investora nehraje až tak významnou roli, jako spíše samotný návrh, o kterém je jisté, že nebude v nejbližší době realizovaný, nýbrž hraje roli v budoucnosti (za lepší investiční situace), kdy lze očekávat pokles ceny bateriového uložení a celkové vylepšení této technologie. Následně autorka provedla citlivostní analýzy, ze kterých je patrné, že za určitých situací by investice výnosná byla. Jedná se o situace, kdy by eskalace cen za poskytování SVR vzrostla nad 90 % a eskalace cen za elektřinu by vzrostla nad 15 %. Po těchto změnách by byla nejvýhodnější investice do Varianty 4 s poskytováním služby FCR. Nicméně dle autorky stojí z technického hlediska za uváženou investice do nového rozvaděče.

Na základě výčtu autorčiny práce lze konstatovat, že byly splněny všechny body zadání.

Autorka se po celou dobu studia zabývá obnovitelnými zdroji a akumulací elektrické energie, tudíž je tato práce velkým přínosem zejména z toho důvodu, že akumulace, především různé typy baterií, budou v budoucí podobě energetiky hrát velkou roli, a to jak v průmyslovém sektoru, tak v domácnostech. Díky rozmachu decentralizované energetiky a blížících se „energetických balíčků“ v rámci politiky Evropské unie lze očekávat potřebu instalace akumulačních uložení a nahradit tak tradiční zdroje pro pokrytí nerovnováhy v síti, poskytování podpůrných služeb síti, ochranu před dlouhodobými výpadky (blackoutem), tj. záložní zdroje, docílení energetické samostatnosti jednotek a zavedení smartgrids. Z tohoto pohledu autorka téma této práce hodnotí jako velmi aktuální a je příhodné se mu touto cestou věnovat.

Jelikož byla práce zadána na základě domluvy s vedoucím provozu VE Štěchovice, velké množství obsahu je upraveno a vedeno tímto směrem. Hlavním požadavkem provozovatele VE Štěchovice byl praktický návrh, který měl být velmi specificky řešený pro prostory a podmínky elektrárny, aby co nejvíce odpovídal realitě a mohl být za několik let s úpravami pomocí při realizaci podobného projektu. Autorka se snažila uvádět vše v souladu s těmito požadavky. Provozovatel si tak z práce může přebrat potřebná data a výpočty (zejména limitující faktory pro návrh), případně ji převzít jako jakýsi obecný přehled pro návrh bateriového uložení. Autorka se snažila nalézt i řešení pro limitující technické podmínky, které může být pro budoucí ostrý návrh nápomocné. Je téměř jisté, že technologie bateriových uložení se bude nadále vyvíjet a posouvat vpřed, autorka tedy nepředpokládá, že by ve VE Štěchovice byl využit konkrétně vybraný kontejner s baterií, avšak v práci skvěle posloužil jako modelový příklad.

Tato diplomová práce by měla sloužit jako jakýsi návod, jak bateriové uložení navrhnout. Jaké jsou možné překážky a na co si dát při podobném návrhu pozor. Z pohledu provozovatele elektrárny Štěchovice byla práce zamýšlena jako první dokument (studie) možné implementace baterie do elektrárny včetně návrhů na její využití a zapojení.

6 Zdroje

- [1] AKU-BAT CZ. EU zavádí nová pravidla pro výrobu a recyklaci baterií: Cílem je soběstačnost, udržitelnost a podpoření konkurenceschopnosti. Online. In: TZB-INFO. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektřiny/25630-eu-zavadi-nova-pravidla-pro-vyrobu-a-recyklaci-baterii>. [cit. 2023-10-12].
- [2] BOUŠKA, Jan. Historie energetiky. In: *SPVEZ* [online]. 2017 [cit. 2023-02-08]. Dostupné z: <https://www.spvez.cz/cs/historie>
- [3] BOYLE, Godfrey. *Renewable Energy: Power for a Sustainable Future*. 3. Londýn: Oxford University Press, 2012. ISBN 978-0199545339.
- [4] BUCHMANN, Insidor. *How does the Fuel Cell Work?* In: Batteryuniversity.com [online]. 2.5.2021 [cit. 2023-02-08]. Dostupné z: https://batteryuniversity.com/index.php/learn/article/fuel_cell_technology
- [5] BUDÍN, Jan. *Přečerpávací vodní elektrárna - princip a uspořádání*. In: *oEnergetice.cz* [online]. 3.3. 2015 [cit. 2023-02-2023]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrina/precerpavaci-vodni-elektrarna-princip- usporadani-2/>
- [6] CIGLER, Jiří. MICROPT DESIGN: Optimální dimenzování hybridních energetických systémů s bateriovým úložištěm. Online. In: *Tzb-info.cz*. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektřiny/19222-micropt-design-optimalni-dimenzovani-hybridnich-energetickyh-systemu-s-bateriovym-ulozistem>. [cit. 2023-10-03].
- [7] CIHLÁŘ, Jan. Investice do decentralních zdrojů energie – 3. díl: Malá vodní elektrárna. Online. In: . Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrina/investice-do-decentralnich-zdroju-energie-3-dil-mala-vodni-elektrarna>. [cit. 2024-01-03].
- [8] ČEPS. Hodnocení zdrojové přiměřenosti ES ČR do roku 2040: (MAF CZ). Pdf. 2022.
- [9] ČEPS a.s., „KODEX PŘENOSOVÉ SOUSTAVY Část 2. Podpůrné služby (PpS)“, s. 214, 2016. [cit. 2023-10-18]
- [10] ČSN 75 2601, *Malé vodní elektrárny - Základní požadavky*. 11/2010. Praha, 2010.
- [11] ČSN 38 1754, *Dimenzování elektrického zařízení podle účinku zkratových proudů*. Praha, 1976.
- [12] EASE [European Association for Storage of Energy]. *Technologies. European Association for Storage of Energy* [online]. [cit. 2023-02-08]. Dostupné z: <https://ease-storage.eu/energy-storage/technologies/>
- [13] DRTINOVÁ, Kateřina. Akumulace elektrické energie a její využití v distribuční síti. Online, Diplomová, vedoucí Ing. Jan Švec, Ph.D. Praha: ČVUT FEL. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/76290/F3-DP-2018-Drtinova-Katerina-Akumulace%20elektricke%20energie%20a%20jeji%20vyuziti%20v%20distribucni%20siti.pdf?isAllowed=y&sequence=-1>. [cit. 2023-10-18].
- [14] ENERGIEBEZEMISI. Trendy v obnovitelných zdrojích 2022: recyklace, ukládání a infrastruktura. Online. 2022. Dostupné z: <https://energiebezemisi.cz/novinky-v-oboru/trendy-oze-2022/>. [cit. 2023-10-12].
- [15] ENERGOSOLAR. Smart grid (chytrá síť). Online. Dostupné z: <https://www.energ solar.cz/smart-grid-chytra-sit>. [cit. 2023-10-18].
- [16] ERÚ. *Roční zpráva o provozu ES ČR 2021* [online]. Praha, 2022 [cit. 2023-02-01]. Dostupné z: <https://www.eru.cz/rocni-zprava-o-provozu-elektrizacni-soustavy-cr-pro-rok-2021>

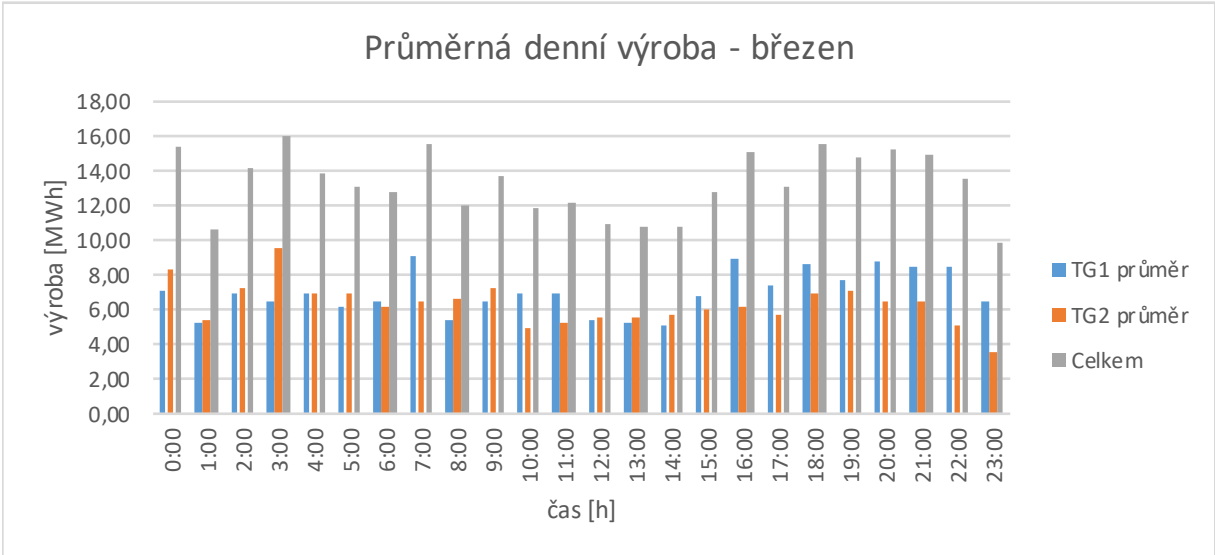
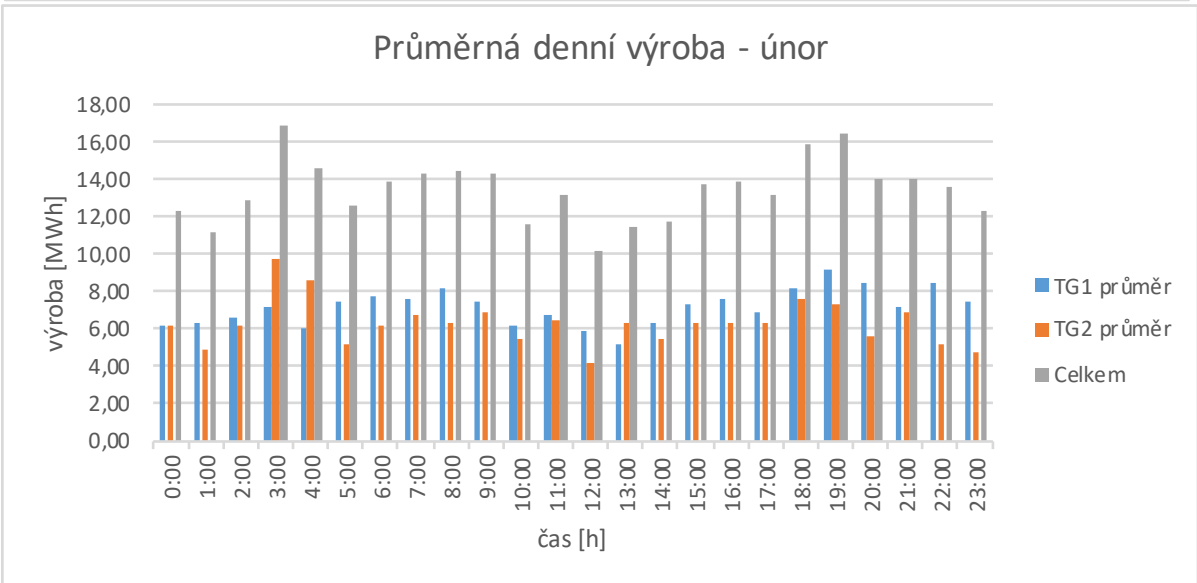
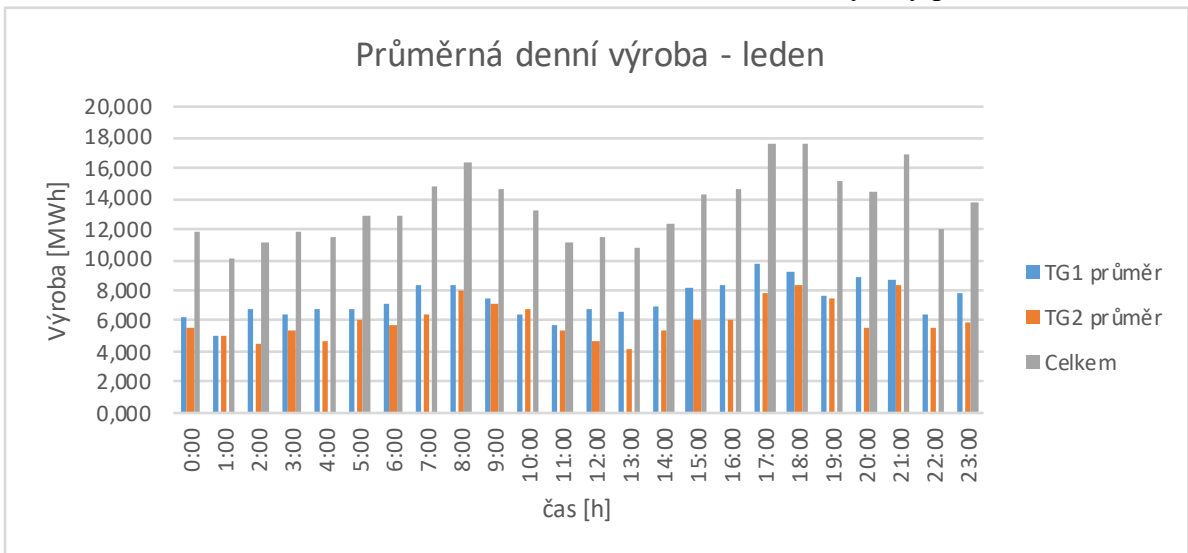
- [17] EVROPSKÝ PARLAMENT. Nová pravidla EU pro udržitelnější a etické baterie. Online. 2023. Dostupné z: <https://www.europarl.europa.eu/news/cs/headlines/economy/20220228STO24218/nov-a-pravidla-eu-pro-udrzitelnejsi-a-eticke-baterie>. [cit. 2023-10-12].
- [18] *FCR Capacity market RI* [online]. Regelleistung.net, 2023 [cit. 2023-12-16]. Dostupné z: [https://www.regelleistung.net/apps/datacenter/tenders/?productTypes=SRL,MRL&markets=BALANCING_CAPACITY,BALANCING_ENERGY&date=2023-12-16&tenderTab=SRL\\$CAPACITY\\$1](https://www.regelleistung.net/apps/datacenter/tenders/?productTypes=SRL,MRL&markets=BALANCING_CAPACITY,BALANCING_ENERGY&date=2023-12-16&tenderTab=SRL$CAPACITY$1)
- [19] HAVLÍK, Daniel. Využití bateriových systémů pro poskytování Podpůrných služeb. Online, Diplomová. Praha: ČVUT FEL. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/68479/F3-DP-2017-Havlik-Daniel-Diplomova%20prace_Daniel%20Havlik.pdf?isAllowed=y&sequence=1. [cit. 2023-10-18].
- [20] HERMAN, Josef a kolektiv. *Příručka silnoproudé elektrotechniky*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1984. DT 621.3.027.3 (075).
- [21] HOUFKOVÁ, Anna; MALÍK, Čeněk a KUBIČKA, Josef. Rozbor vybraných konceptů Smart Grids. Semestrální práce. Praha: ČVUT FEL.
- [22] HRZINA, Pavel. Cykly a životnost baterie. Online. In: oze.tzv-info.cz. Dostupné z: <https://oze.tzv-info.cz/akumulace-elektriny/21096-cykly-a-zivotnost-baterie>. [cit. 2023-11-29].
- [23] CHEN, Min a RINCÓN-MORA, Gabriel A. An Accurate Electrical Battery Model Capable of Predicting Runtime and I–V Performance. Online. In: *EEE Transactions on Energy Conversion*. 21. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/TEC.2006.874229>. [cit. 2024-01-02].
- [24] JAK NA LIFEPO4 BATERIE: TECHNICKÝ PRŮVODCE V 7 KROCÍCH. Online. In: *GWL*. S. 24. Dostupné z: https://files.gwl.eu/inc/doc/LFP_Guide_CZ.pdf. [cit. 2023-12-14].
- [25] JURÍK, Michal. *Zapojení baterie Mýdlovary pro poskytování podpůrných služeb v rámci projektu Elfex* [online]. 2012 [cit. 2023-2-12].
- [26] KAŠÁK, Martin. Výzvy provozovatele přenosové soustavy [online]. ČEPS, a.s., 2022 [cit. 2023-12-16]. Dostupné z: <https://moodle.fel.cvut.cz/course/view.php?id=6905>
- [27] KRÁLOVÁ, Magda. *Činnost přečerpávací elektrárny: Věda a technika v pozadí* [online]. 2007 [cit. 2023-02-08]. Dostupné z: <http://edu.techmania.cz/cs/veda-v-pozadi/663>
- [28] KRČÁL, Jan; OTÝPKOVÁ, Laura a KOLOUCHOVÁ, Kateřina. Rozvoj obnovitelné energie v Česku do roku 2030: Pro posílení bezpečnosti a plnění klimatických cílů EU. Online. In: . S. 42. Dostupné z: <https://faktaoklimatu.cz/assets-local/publications/2023-rozvoj-obnovitelne-energie-v-cesku-do-2030.pdf>. [cit. 2023-10-12].
- [29] KUGEL, Lubomír. *Akumulace elektrické energie*. Plzeň, 2021. Bakalářská. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Prof. Ing. Jan Škorpil, CS.c.
- [30] KURFIŘT, Martin a JURÍK, Michal. Hodnocení zkušebního provozu bateriového bateriového úložiště v Mýdlovarech. Online. In: *Sborník ČK CIREĐ*. S. 12. Dostupné z: <https://saeceweb01runblobcorewindowsnet-endpoint.azureedge.net/eonmedialibcontainer/e.on/media/documents/cired2018s4p11-baterie.pdf?guid=a9f16c1f-126e-4869-bb1c-c98fa17521f3&last-modified=637533235936050127>. [cit. 2023-12-11].

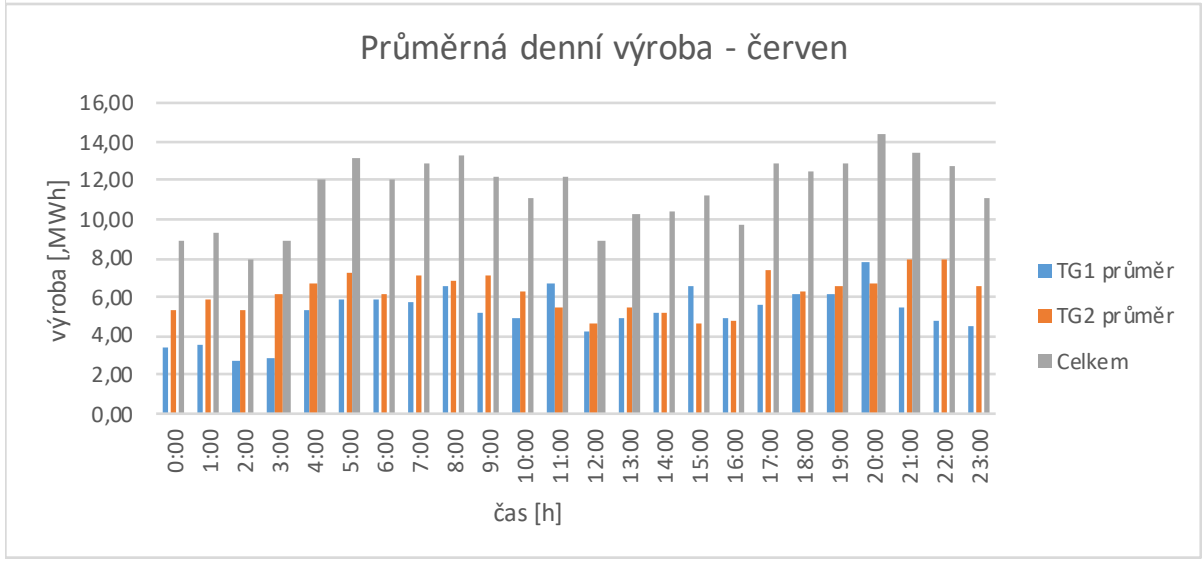
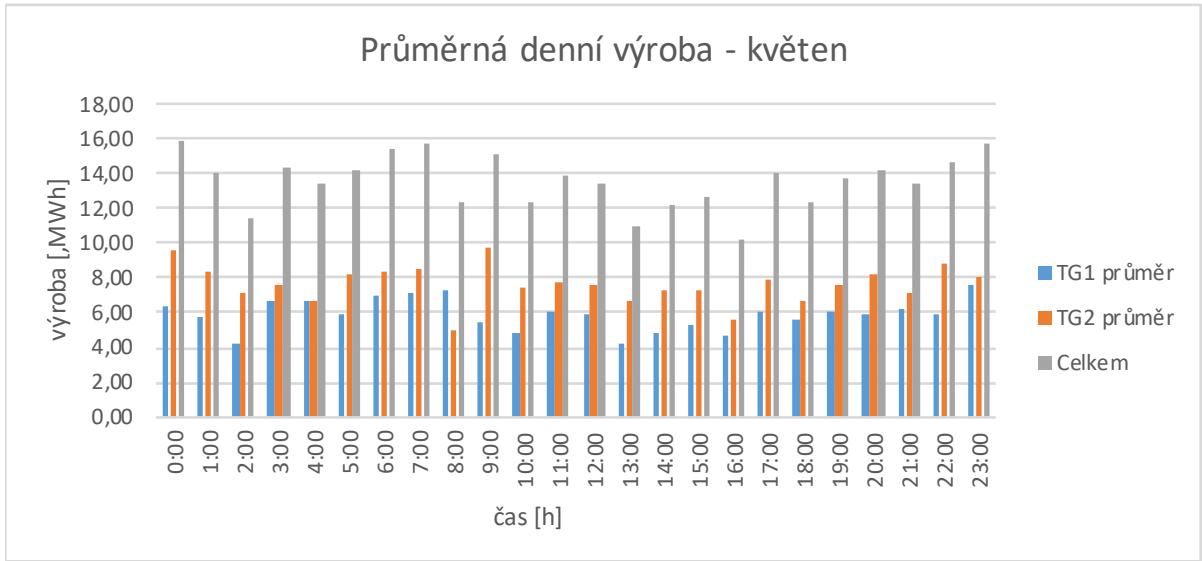
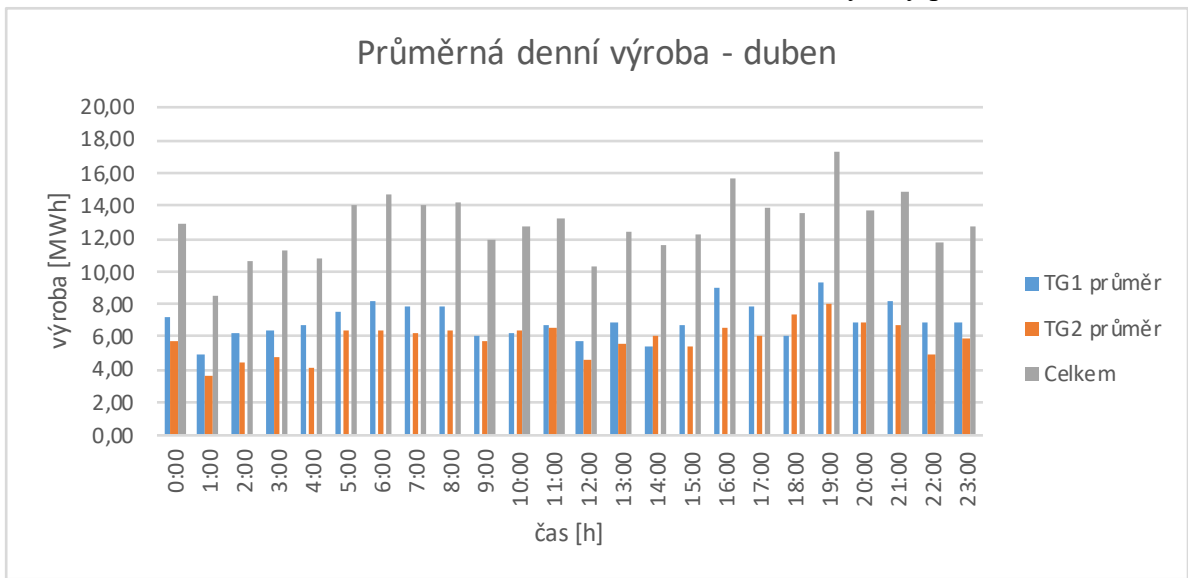
- [31] LI, An; PELISSIER, Serge; VENET, Pascal a GYAN, Philippe. Fast Characterization Method for Modeling Battery Relaxation Voltage. Online. In: *Batteries*. 2. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2313-0105/2/2/7>. [cit. 2024-01-02].
- [32] MADEJ, Martin a SRB, Jáchym. Role vodíku v zajištění energetické bezpečnosti ČR v kontextu dekarbonizace ekonomiky: Klimatický paper č. 10. Online. In: Amo.cz. S. 29. Dostupné z: https://www.amo.cz/wp-content/uploads/2021/05/AMO__Role_vodik_u_v_zajisten_i_energeticke_bezpecnosti_CR_.pdf. [cit. 2023-10-12].
- [33] MAJLING, Eduard. Ceny velkých bateriových úložišť v USA poklesly za 3 roky o 70 %. Online. In: OEnergetice.cz. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/akumulace-energie/ceny-velkych-bateriovych-ulozist-usa-poklesly-za-3-roky-70>. [cit. 2023-10-12].
- [34] MAREŠ, Jan, Martin LIBRA a Vladislav POULEK. Akumulace elektrické energie. *Elektro* 2 [online]. 2011 [cit. 2023-02-12]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/42869.pdf>
- [35] MASTNÝ, Petr, DRÁPELA, Jiří, aj., 2011. *Obnovitelné zdroje elektrické energie*. Praha: České vysoké učení technické v Praze. 256 s. ISBN 978-80-01-04937-2.
- [36] Mensuál skutečnost EŠT1. 2018. 2022. Štěchovice: ČEZ a.s.
- [37] Nařízení vlády č. 189/2022 Sb.: Nařízení vlády o vymezení rozvoje podporovaných zdrojů energie, ve znění pozdějších předpisů. In: *Sbírka zákonů*. 2022.
- [38] NOCAR, Václav. *Využití akumulace elektrické energie a její vliv na trh s elektřinou* [online]. Plzeň, 2020 [cit. 2023-02-12]. Dostupné z: https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/40211/1/DP_Vaclav_Nocar_final.pdf. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [39] PLCHÚT, Martin. Co je Smart Grid? Online. In: TZB-INFO. Dostupné z: <https://elektro.tzb-info.cz/12544-co-je-smart-grid>. [cit. 2023-10-18].
- [40] PROVOZOVATELÉ DISTRIBUČNÍCH SOUSTAV. Pravidla provozování distribučních soustav - příloha č.2 (METODIKA URČOVÁNÍ PLYNULOSTI DISTRIBUCE ELEKTRINY A SPOLEHLIVOSTI PRVKŮ DISTRIBUČNÍCH SÍTÍ). ČEZ Distribuce. [Online] 12 2008. [Cit. 2023-10-18.] http://www.cezdistribuce.cz/edee/content/file-other/distribuce/energeticka_legislativa/ppds/2009/ppds2009_priloha_2.pdf.
- [41] PRAKAB. *Instalační kabely CYKY*. Online. 2023. Dostupné z: <https://www.prakab.cz/upload/products/CYKY.pdf>. [cit. 2023-12-16].
- [42] *Průtočné a akumulární vodní elektrárny: Jak fungují*. Online. In: Svět energie. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/obnovitelne-zdroje-energie-pro-deti/vodni-energie-pro-deti/prutocne-a-akumulacni-vodni-elektrarny/jak-funguji#&gid=1&pid=2>. [cit. 2023-09-23].
- [43] SABRU, Ioan, SEBARCHIEVICI, Calin. *A Comprehensive Review of Thermal Energy Storage* [online]. 14.1.2018 [cit. 2023-02-08]. ISSN 2071-1050. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/su10010191>
- [44] SANDER, Michael, GEHRING, Rainer, aj. *LIQHYSMES storage unit* [online]. In: 19. International Journal of Hydrogen Energy. 2012 [cit. 2023-02-08]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.07.019>
- [45] SYMTECH SOLAR. *MEGATRON 1MW BATTERY STORAGE SYSTEM*. Online. 2008, 2023. Dostupné z: <https://www.symtechsolar.com/battery-energy-storage-systems/1mw-battery-energy-storage-system/>. [cit. 2023-12-15].
- [46] Sandia national laboratories, „DOE global energy storage database“, Database, 2016. [Online]. Dostupné z: <http://www.energystorageexchange.org/>. [cit. 2023-10-18]

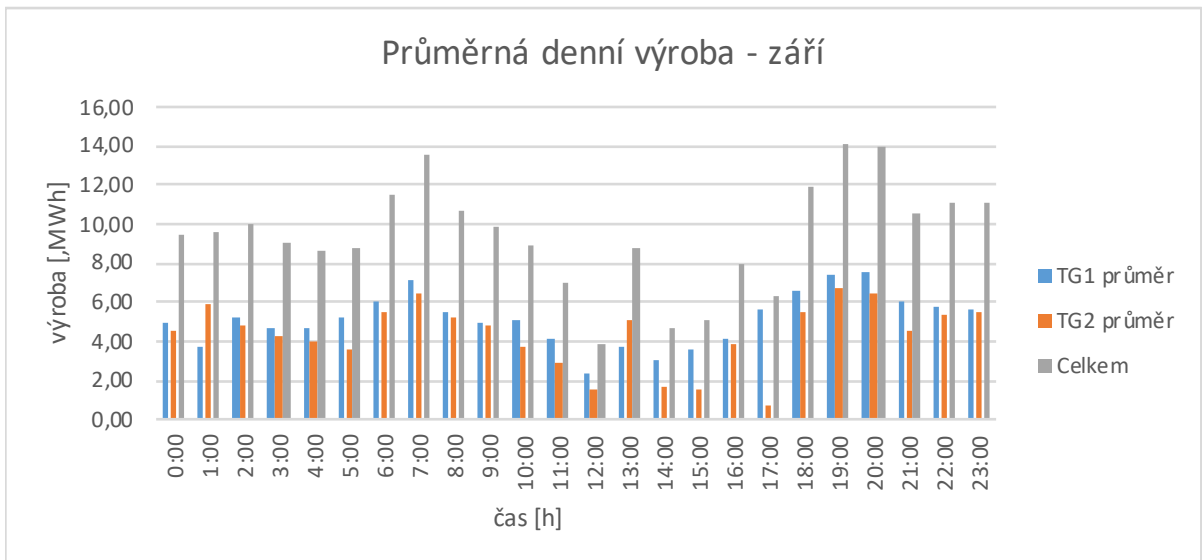
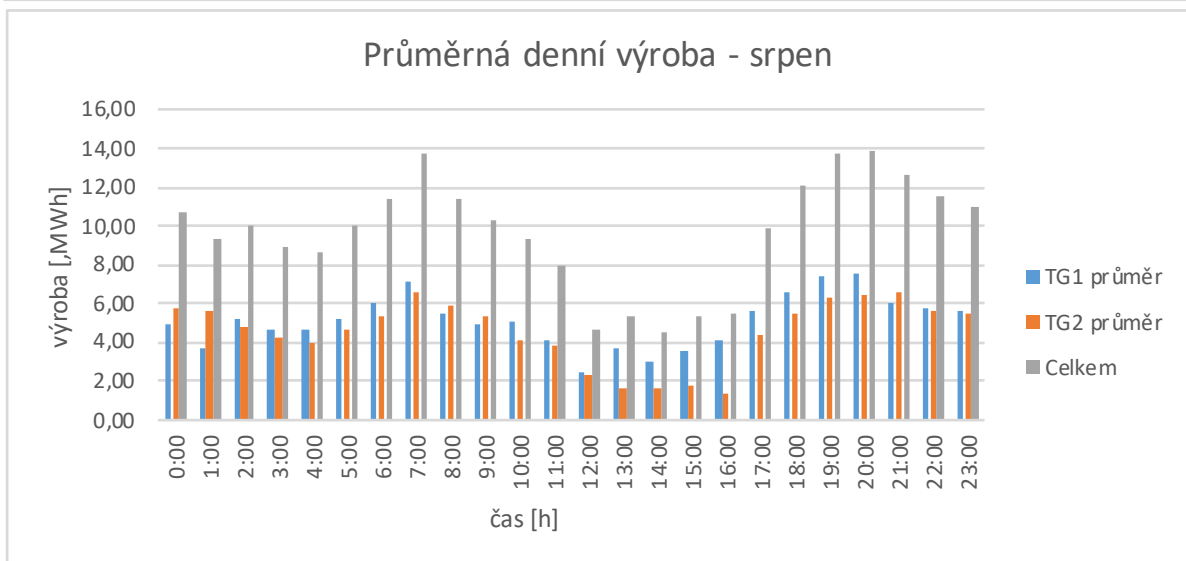
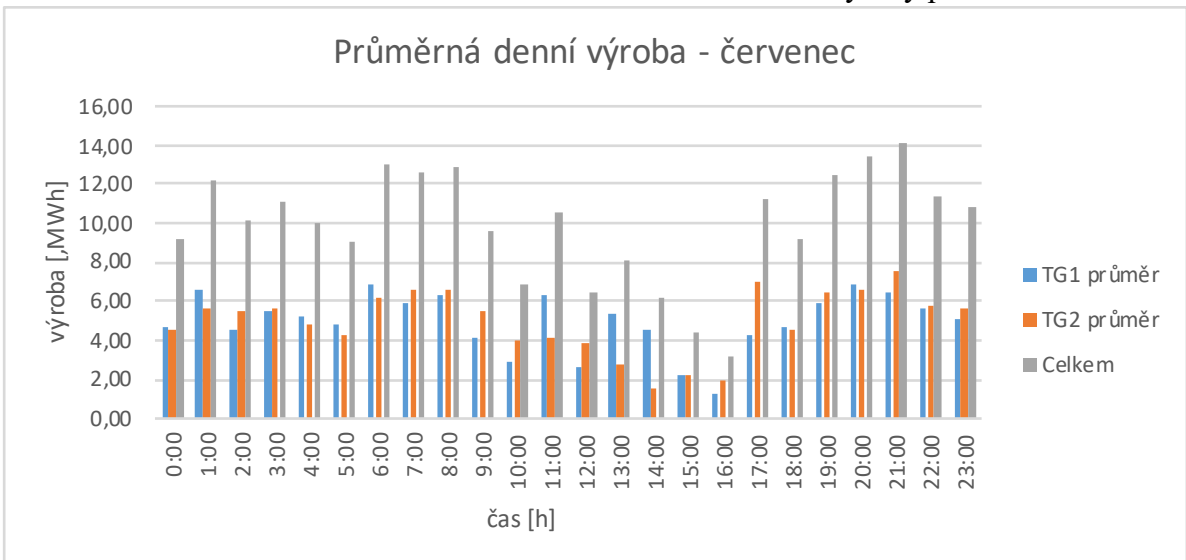
- [47] STRIAL, Štěpán. *Zajišťování systémových služeb*. Online, ČEPS, a.s., 2021 [cit. 2023-12-16]. Dostupné z: Moodle FEL.
- [48] STUDENÍK, Jiří a Michal SVITAVSKÝ. *Energie vody, větru, biomasy* [online]. 2016. Brno: Podpora přírodovědného a technického vzdělávání na středních školách v Jihomoravském kraji [cit. 2021-03-26]. ISBN 978-80-88058-08-3. Dostupné z: <https://publi.cz/books/90/Impresum.html>
- [49] TKÁČ, Martin a STEHLÍK, Karin. *Centrální výroba vodíku*. In: Chemické listy [online]. **111**(2), 121- 128. 2017 [cit. 2023-02-08]. ISSN 1213-7103. Dostupné z: <http://www.chemicke-listy.cz/ojs3/index.php/chemicke-listy/article/view/31/31>
- [50] *V Evropě už jsou stovky bateriových úložišť, v Česku zatím čtyři. Nahradí je v budoucnosti vodík?* Online. In: Hybrid.cz. Dostupné z: <https://www.hybrid.cz/v-evrope-uz-jsou-stovky-bateriovych-ulozist-v-cesku-zatim-ctyri-nahradi-je-v-budoucnosti-vodik/>. [cit. 2023-10-02].
- [51] VĚDAVÝZKUM.CZ. Klíčem k energetické nezávislosti není jádro, ale obnovitelné zdroje a inovace. Online. 2023. Dostupné z: <https://vedavyzkum.cz/z-domova/z-domova/klicem-k-energeticke-nezavislosti-neni-jadro-ale-obnovitelne-zdroje-a-inovace>. [cit. 2023-10-12].
- [52] *VD Štěchovice*. Online. In: PVL.cz. Dostupné z: <https://www.pvl.cz/files/download/vodohospodarske-informace/vodni-dila-a-nadrze/stechovice.pdf>. [cit. 2023-10-03].
- [53] VOBOŘIL, David. *Přečerpávací vodní elektrárny v České republice*. In: *Energetice* [online]. 3.1.2017 [cit. 2023-02-08]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrina/precerpavaci-vodni-elektrarny-v-ceske-republice>
- [54] *Vodní elektrárny Štěchovice*. Online. SKUPINA ČEZ. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobni-zdroje/obnovitelne-zdroje/voda/vodni-elektrarny/ceska-republika/stechovice-58100>. [cit. 2023-10-03].
- [55] VRÁNKOVÁ, Kateřina. *ECOBAT získal oprávnění k provozování kolektivního systému. Nově nabízí řešení pro průmyslové a startovací baterie*. Online. In: ECOBAT.cz. Dostupné z: <https://www.ecobat.cz/2022/12/21/ecobat-ziskal-opravneni-k-provozovani-kolektivniho-systemu/>. [cit. 2023-10-12].
- [56] VYTLAČIL, Petr. *Kombinace vodních elektráren a baterií jako alternativa přečerpávacích elektráren? Tuto alternativu ověřují v USA*. Online. In: oEnergetice. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/akumulace-energie/kombinace-vodnich-elektraren-baterii-jako-alternativa-precerpavacich-elektraren-tuto-alternativu-overuji-usa>. [cit. 2023-10-03].
- [57] VYTLAČIL, Petr. *Recyklace li-ion baterií – úvod*. Online. In: OEnergetice.cz. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/akumulace-energie/recyklace-lithium-ion-baterii-uvod>. [cit. 2023-10-12].
- [58] WESLEY, Cole a FRAZIER, A. Will. *Cost Projections for Utility-Scale Battery Storage*. Online. In: *National Renewable Energy Laboratory*. Dostupné z: <https://www.nrel.gov/docs/fy19osti/73222.pdf>. [cit. 2023-12-16].
- [59] World Energy Council. *World Energy Resources - E-Storage 2016*. World Energy Council. [Online] [Cit. 2023-10-18.] https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2017/03/WEResources_E_storage_2016.pdf.
- [60] ZENKNER, Petr. *Rozvoj bateriových úložišť brzdí zákony.: Nejsou ani peníze z Modernizačního fondu*. Online. In: *Hospodářské noviny*. S. 1. Dostupné z: <https://archiv.hn.cz/c1-66970550-rozvoj-bateriovych-ulozist-brzdi-zakony-nejsou-ani-penize-z-modernizacniho-fondu>. [cit. 2023-10-02].

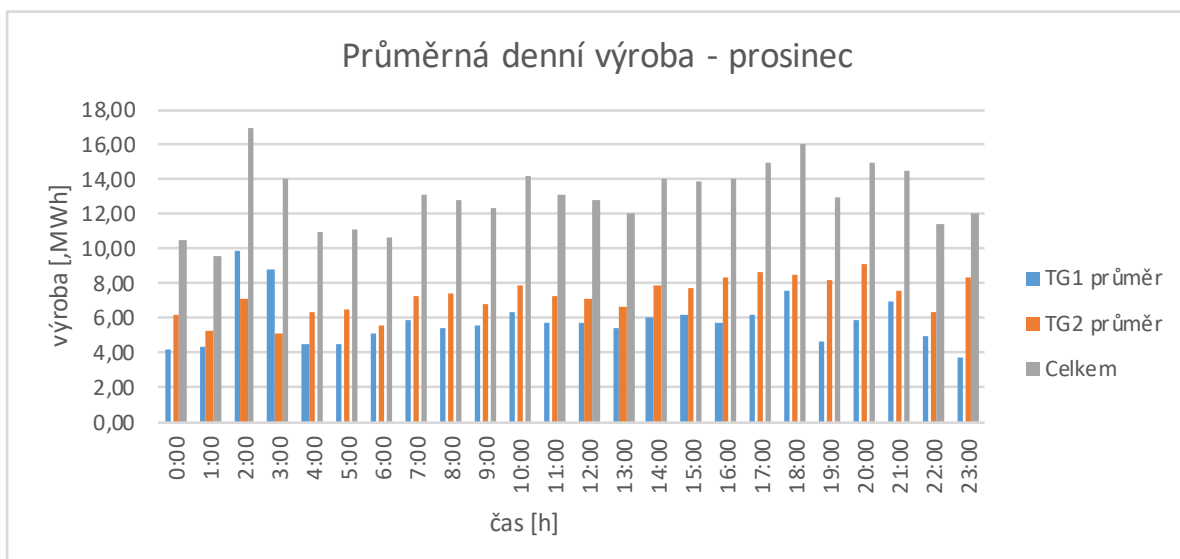
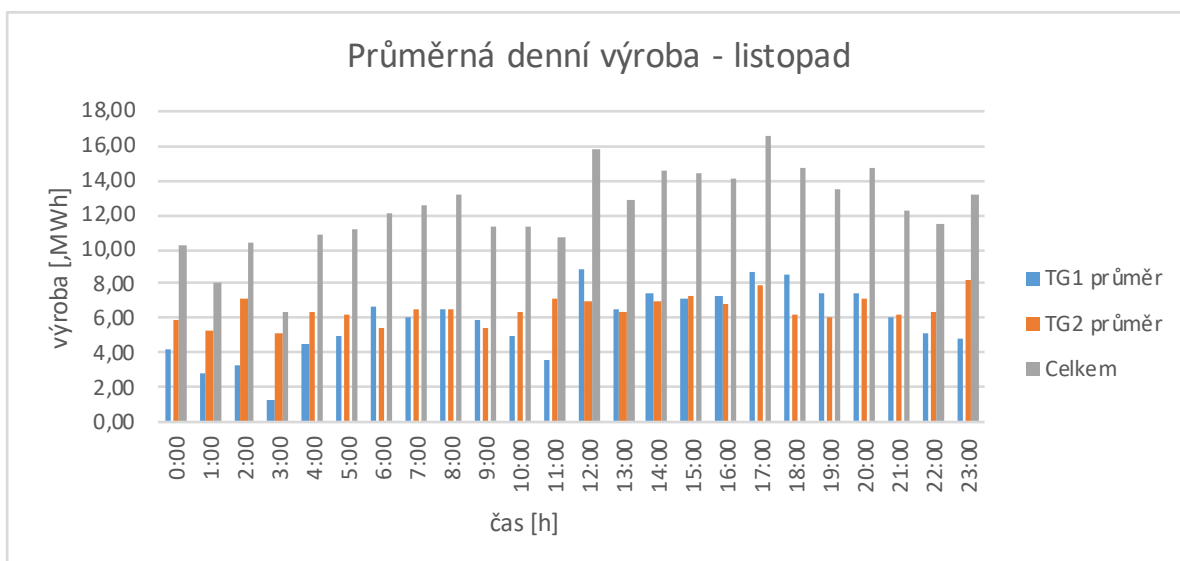
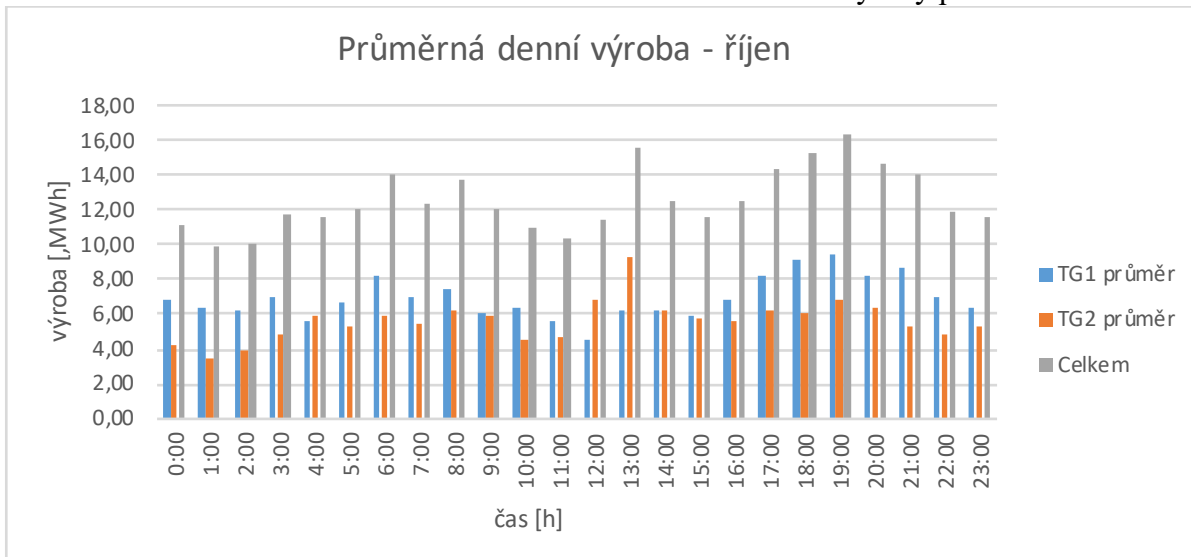
- [61] Zákon č. 254/ 2001 Sb. o vodách a o změně některých zákonů (vodní zákon), ve znění pozdějších předpisů. In: *Sbírka zákonů*. 2001. Praha.
- [62] Zákon 458/2000 Sb. o podmínkách podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích a o změně některých zákonů (energetický zákon), ve znění pozdějších předpisů. In: *Sbírka zákonů*. Praha.
- [63] ZILVAR, Jiří. Baterie při poskytování podpůrných služeb šetří miliony dolarů. Jak to dělají? Online. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektřiny/22413-baterie-pri-poskytovani-podpurnych-sluzeb-setri-miliony-dolaru-jak-to-delaji>. [cit. 2023-10-18].
- [64] *Zkratové poměry - výpočet velikosti zkratových proudů*. Online. In: Západočeská univerzita. Dostupné z: https://home.zcu.cz/~nohac/EE1/CV-EE1-5-Dimenzovani_vodicu_2.pdf. [cit. 2023-12-12].
- [65] *2 MVA 2000 KVA 11KV až 415V sestupný*. Online. In: Scotech. Dostupné z: <http://cz.scotech-electrical.com/transformer/distribution-transformer/2-mva-2000-kva-11kv-to-415v-step-down.html>. [cit. 2023-12-12].

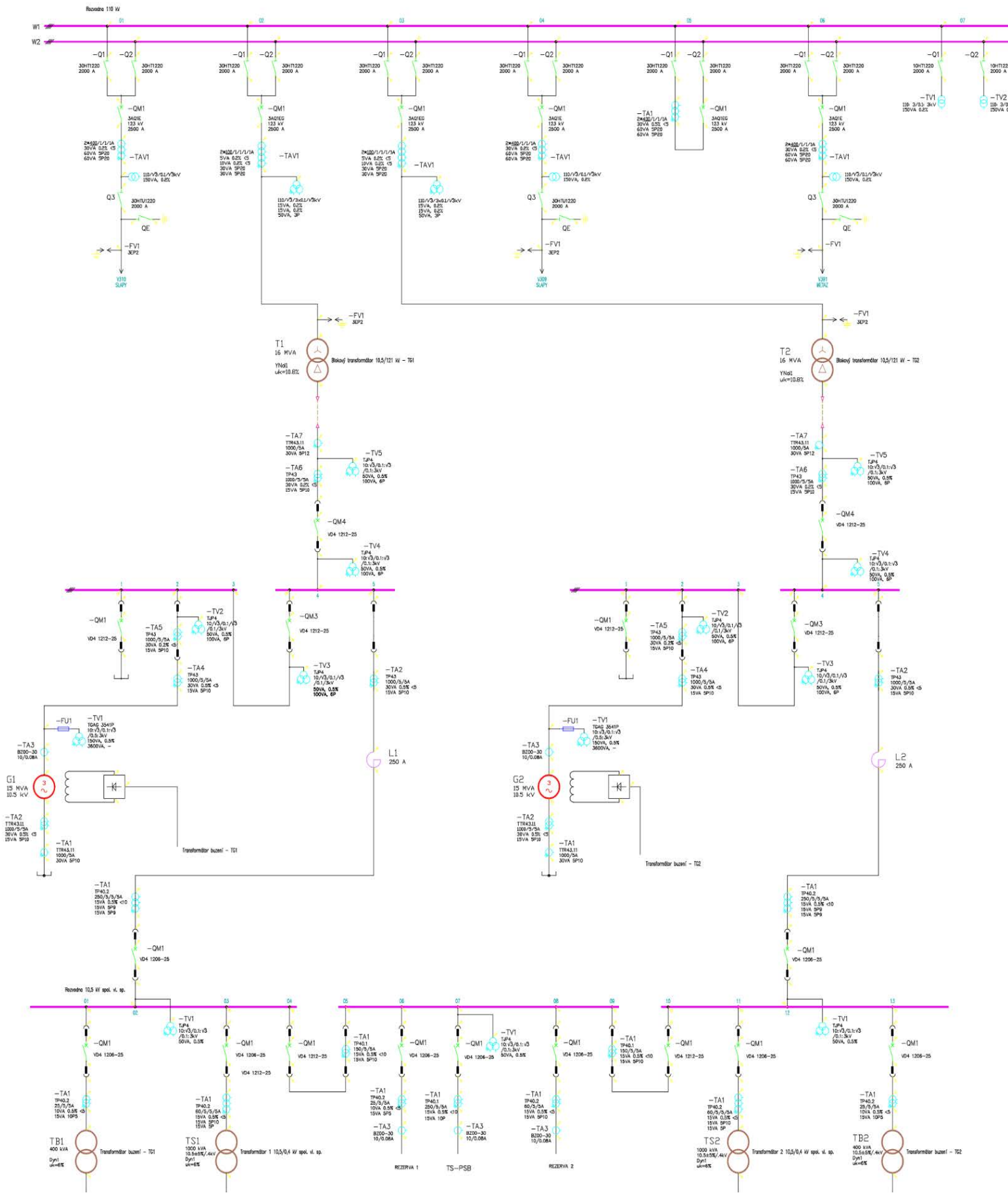
PŘÍLOHOVÁ ČÁST











Symtech Solar | Technical System Specifications

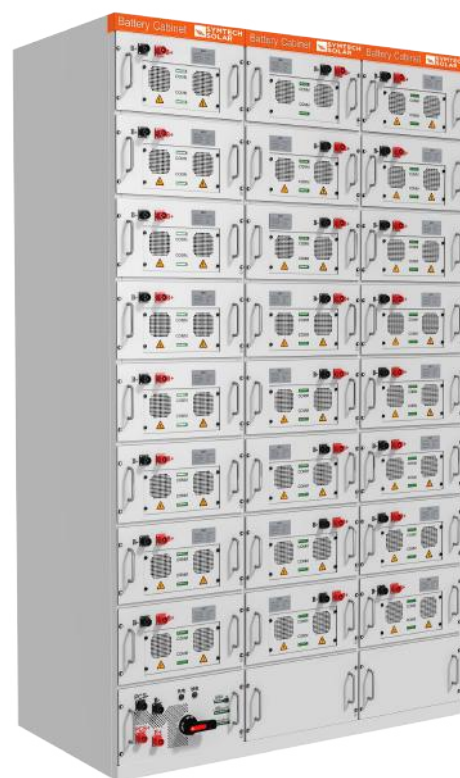
MEGATRON 1000kW Battery Energy Storage Systems

Item	1MW/1.72MWh	1.2MW/2.064MWh
DC Data		
Battery chemistry	Lithium Iron Phosphate (LFP)	
Cell life cycle	80% Retention with 5,000 Cycles @ 0.5C 25°C	
Cell spec	3.2V/280Ah	
String configuration	1P384S	
Number of strings	5	6
Rated energy capacity (80%)	1.376kWh	1651kWh
DC rated energy capacity	1,720kWh	2,064.36kWh
Rated voltage	1,228.8V	
Voltage range	1,075.2V-1,363.2V	
BMS communication interface	RS485, Ethernet	
BMS communication protocol	Modbus RTU, Modbus TCP	
AC Data		
Rated AC power	1000kW	1,000kW
Maximum AC power	1,100kW	1,320kW
Rated voltage	690V	
Grid voltage range	586.5-759V(Optional)	
AC rate of current	669.4A	836.8A
Output THDi	< 3%	
AC PF	0.1-1 leading or lagging (Controllable)	
Isolation method	Three-phase and three-wire	
General Data		
Dimension w/o clearances (L*W*H)	6,058x2,438x2,591mm	
System Weight (containerized)	23t	26.5t
Degree of protection	IP65	
Operating temperature range	-20-40°C	
Relative humidity	0-95% (non-condensing)	
Max working altitude	4,000m/13,123ft	
Cooling concept of DC hatch	HVAC	
Communication interfaces	RS485, Ethernet, GPRS	
Certifications	UL9540 , IEC62619, IEC62109, IEC62933, UN3536, etc	

Symtech Solar | Major System Components

MEGATRON 1000kW Battery Energy Storage Systems

Item	Data
Battery module configuration	S373-24P14
Pack QTY per rack	24
Nominal rack capacity	344kWh
Discharge cutoff - rated voltage - charge cutoff voltage	1075.2 - 1228.8 - 1363.2
Pack	3.2V/280Ah@1P16S
Rated voltage	280Ah
BMU Qty	24
String voltage sampling period	100ms
String measuring current range	+/-350A
String current detection accuracy	≤1%
SOC calculation accuracy	≤7%
Input insulation resistance	≥10MΩ, 1,500V DC
Communication	Modbus TCP, CAN, Modbus RTU
System cycle life	≥5,000 cycles @ 0.5C, 25C
Weight	2940kg
Certifications	UL1973, UL9540A, IEC62619, CE , UN38.3

**Battery String-S344**

- 0.5C Charge/Discharge
- The energy supply can be a single battery string or parallel battery strings
- Easy configuration and maintenance

Item	Data
DC voltage range	1,000-1,500Vdc
DC voltage max	1500Vdc
Maximum DC current	224.5A
Maximum PV current	384A
Rated output power	200kW
Rated grid voltage	690Vac, 3W+PE
Grid voltage range	586.5-759V (settable)
The frequency range of the power grid	50/60Hz
AC Max current	184.1A
Cooling	Temperature controlled forced air cooling
Max efficiency	99%
AC PF	0.1-1 leading or lagging
Communication interface	RS485/CAN/Ethernet
Weight	100kg

**Power Conversion System**

- Three-level topology, up to 99% conversion efficiency, better power quality
- Integrated cluster-level battery management function, high battery availability
- Intelligent multi-stage fan speed regulation, wide temperature operation capacity, 50 °C no derating
- Supports constant power, constant current, constant voltage control, with a frequency modulation, VSG, black start and other functions
- Supports IEC61850 protocol, with MS-level responsiveness
- IP66 protection

MEGATRON 1000kW Battery Energy Storage Systems



Battery Pack-P14



TCP / RS485



TCP / RS485



Life span >5,000 cycles @ 0.5C/25C

Item	Data
Capacity (kWh)	14.336kWh
Rated voltage	51.2V
Discharge cut-off voltage	44.8V
Charge cut-off voltage	56.8V
Cycle life	+5,000 cycles @ 0.5C 25C
Voltage detection accuracy of battery cell	310 mV
Temperature detection accuracy of battery cell	±2°C
Balancing current of battery cell	≥150mA
Range of voltage measurement for battery cell	1-5 V
Battery balancing method	Passive balancing
Certifications	UL1973, IEC62619, UN38.3



M215-HVU



Multistage protection



Rich interface



Dual-channel power supply

Item	Data
Circuit breaker	250A
Hall sensor	300A
Leakage current sensor	50mA
Fuse	250A
Error range of voltage detection accuracy	+/-1%
Error range of Current detection accuracy	+/-1%
Temperature detection accuracy	±2°C
Operating life	10 years
Certifications	UL1973



BESS Controller



Pre-engineered control strategy

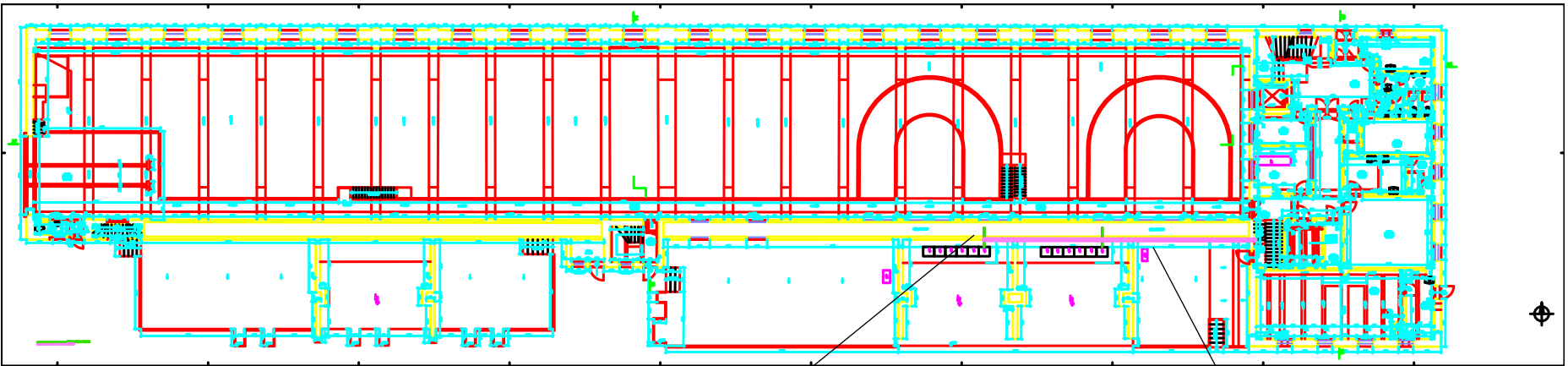


Easy configuration



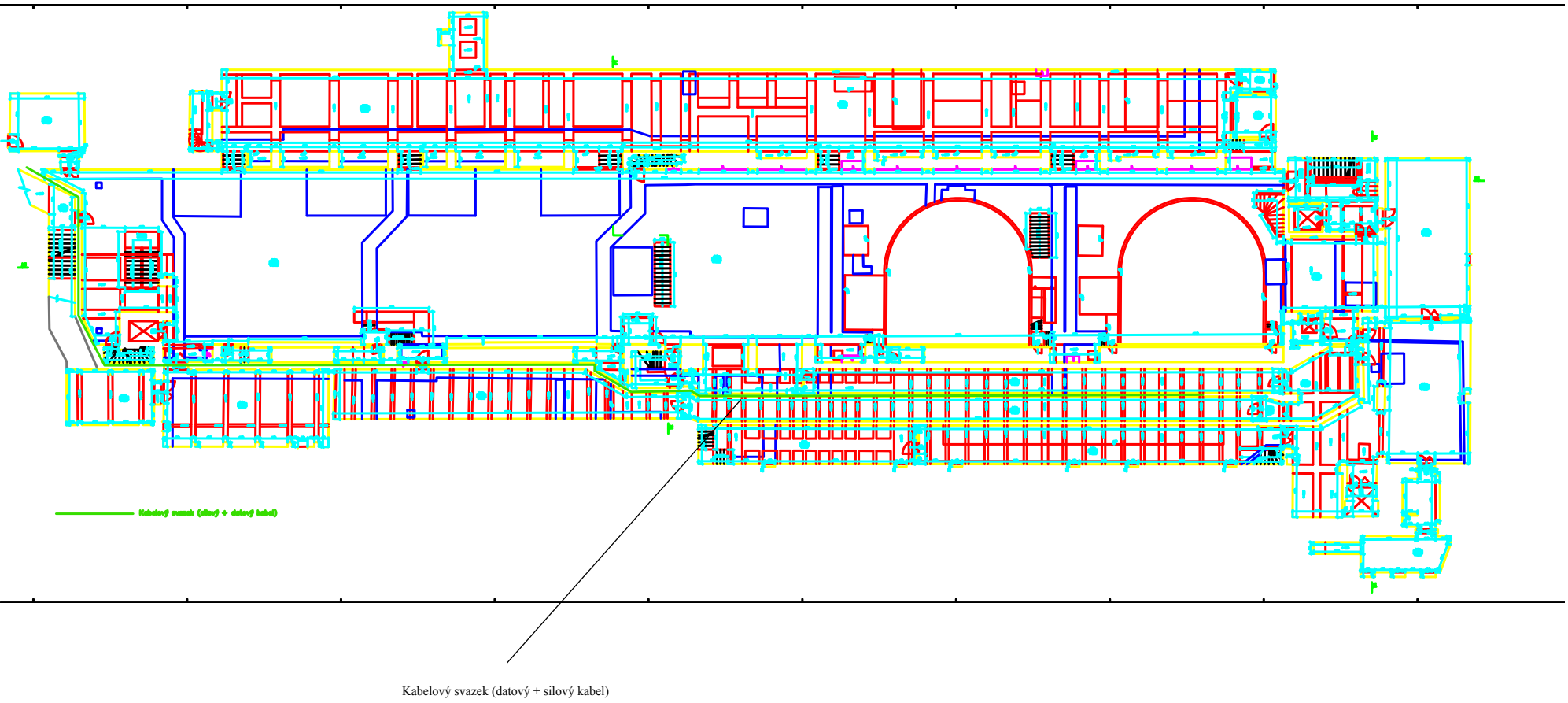
Cloud base data communication

Item	Data
Dimension (L*W*H)	480 x 230 x 770mm
Relay	4 dry contacts inputs / outputs
Power interface	AC 220V, 50/60Hz
PCS communication	TCP/RS485
HVU communication	TCP/IP
HVAC communication	RS485
Grid control application	Time shifting, peak shaving, renewables smoothing1
Battery management system	DC busbar incoming control



Kabelový svazek (datový + silový kabel)

Datový kabel



1.0 PŘEDMĚT NABÍDKY

1.1 Nabídková cena

Položka	Produkt	Popis	Počet	Jednotková cena (CZK)	Celková cena (CZK)
1.	UniGear type ZS1	UniGear type ZS1: Switchgear 01BAA - Var.1 (10kV; 1250A; 25kA/1s; 8panels; 40°C)	1	5 166 900	5 166 900
2.	UniGear type ZS1	UniGear type ZS1: Switchgear 01BAA - Var.2 (10kV; 1250A; 25kA/1s; 8panels; 40°C)	1	5 072 000	5 072 000
				(CZK)	10 238 900

REVIZE	NÁZEV DP Bateriové úložiště_MV	TYP NABÍDKY Non-Binding
--------	-----------------------------------	----------------------------



Země původu:

Položka	Popis	Země původu
1.	UniGear type ZS1: Switchgear 01BAA - Var.1(10kV; 1250A; 25kA/1s; 8panels; 40°C)	Česká Republika
2.	UniGear type ZS1: Switchgear 01BAA - Var.2(10kV; 1250A; 25kA/1s; 8panels; 40°C)	Česká Republika

Poznámky k ceně

Uvedené ceny jsou ve vztahu k obsahu nabídky pevné a rozumí se **bez DPH!** K uvedeným cenám bude připočtena DPH v zákonné výši platné ke dni fakturace.

Ke stanovení ceny nabídky byl použit kurz ČNB. Nabízející si vyhrazuje právo upravit v návrhu smlouvy nabídkovou cenu dle skutečného kurzu uvedených měn ke dni zpracování návrhu smlouvy.

Tato rozpočtová/informativní nabídka je předběžná a nezávazná. Nabídka je předkládána pouze jako podklad pro další jednání, není návrhem na uzavření smlouvy a ABB si vyhrazuje právo kdykoli bez nutnosti předchozího oznámení tuto nabídku na základě vlastního uvážení změnit. Jakákoliv smlouva o předmětu plnění podle této nabídky je podmíněna předchozím dosažením dohody o ceně (která může být odlišná od ceny uvedené v této nabídce), harmonogramu plnění, rozsahu plnění a dalších smluvních podmínkách.

1.2 Nabídka nezahrnuje (předmětem nabídky není)

- zvýšený počet standardních přístrojů
- **supervize, zprovoznění a zkoušky rozvaděče na stavbě**
- **výpočet nastavení ochran**
- **nastavení a zprovoznění ochran na stavbě**
- externí kabely a zemnicí vodič rozvaděče
- instalaci a zkoušky na stavbě
- ss zdroje, baterie a nabíječky
- **nastavení a konfiguraci řídicího systému**
- kabelové soubory

ABB REFERENCE 23604872	REVIZE	NÁZEV DP Bateriové úložiště_MV	TYP NABÍDKY Non-Binding
---------------------------	--------	-----------------------------------	----------------------------

Investiční výdaje		rozvaděč
Bateriový kontejner	23 100 000,00 Kč	
Rozvaděč	5 200 000,00 Kč	
Výstavba	500 000,00 Kč	
Cena za reinvestici (baterie)	6 930 000,00 Kč	30%
Celkem	28 800 000,00 Kč	
Roční výdaje		
Cena za údržbu	12 000,00 Kč	
Cena za revize	5 000,00 Kč	

Parametry	
Instalovaný výkon [MW]	1
Doba hodnocení [let]	20
Životnost [let]	13
Využitelná kapacita [kWh]	1376
Vlastní spotřeba [kWh]	720

Cena za poskytování FCR-	1	Kč/kWh	
Cena za nakoupenou elektřinu	2,5	Kč/kWh	
Cena za poskytování FCR	3,8	Kč/kWh	dle VŘ (výhodnější)
Cena za poskytování aFRR+	3,611	Kč/kWh	dle VŘ
Cena za poskytování aFRR-	0,50911	Kč/kWh	dle VŘ

Eskalace	
Diskont	5,0%
Eskalace cen za SVR	10,0%
Eskalace cen el. energie	3,7%
Eskalace cen za revize	3,1%

Investiční výdaje		1 skříň
Bateriový kontejner	23 100 000,00 Kč	
Rozvaděč	800 000,00 Kč	
Výstavba	500 000,00 Kč	
Cena za reinvestici (baterie)	6 930 000,00 Kč	
Celkem	24 400 000,00 Kč	
Roční výdaje		
Cena za údržbu	15 600,00 Kč	
Cena za revize	6 500,00 Kč	

Varianta 1

Baterie každý den dodává do sítě energii na FCR o kapacitě 17,97 kWh. A pro FCR odebrává při nabíjení ze sítě 10 kWh.

Baterie je nabíjena pouze generátorem, případně při poskytování SVR.

Kapacita 50 kWh je odebrána na vlastní spotřebu baterie.

Kapacita 1308,03 kWh je odebrána na vlastní spotřebu elektrárny.

Celková kapacita: 1376 kWh využitelná kapacita (80 %)

Spotřeba baterie ze sítě [kWh]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Spotřebováno v objektu [kWh]	0	1308,03	1308,03	1308,03	1308,03	1308,03	1308,03	1308,03	1308,03	1308,03	1308,03	1308,03	1308,03	1308,03	1308,03	1308,03	1308,03	1308,03	1308,03	1308,03	1308,03	1308,03
Prodej do sítě [kWh]	0	17,97	17,97	17,97	17,97	17,97	17,97	17,97	17,97	17,97	17,97	17,97	17,97	17,97	17,97	17,97	17,97	17,97	17,97	17,97	17,97	17,97
Výkup ze sítě [kWh]	0	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10

Rok	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
Celkové počáteční investice	28800000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Reinvestice	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12003251,4	0	0	0	0	0	0
Výdaje	0	17000	18059,63652	19774,3762	22316,9407	25960,3415	31126,9966	38470,1307	49009,4246	64360,0206	87125,5853	121585,468	174919,64	259436,995	396714,44	625452,014	1016711,24	1704147,47	2945379,97	5249513,08	9648489,1	
1. Údržba	0	12000	12765,43152	14006,089	15849,8585	18499,5441	22270,1831	27651,1805	35410,3887	46770,8042	63715,6485	89525,0363	129738,846	193920,036	298952,687	475345,479	779548,967	1318574,16	2300344,33	4139122,33	7681584,35	
2. Revize	0	5000	5294,205	5768,28723	6467,08214	7460,79747	8856,8135	10818,9502	13599,0359	17589,2165	23409,9368	32060,4316	45180,7942	65516,9593	97761,7528	150106,535	237162,269	385573,314	645035,644	1110390,75	1966904,75	
3. Nakoupená elektřina	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Příjmy	0	3478,1634	3613,298278	3754,01363	3900,57159	4053,24949	4212,34094	4378,15702	4551,02762	4731,30282	4919,35448	5115,57787	5320,39354	5534,2493	5757,62238	5991,02184	6234,99111	6490,11085	6757,00202	7036,32923	7328,80444	
CF	-28800000	-13521,837	-14446,33824	-16020,363	-18416,369	-21907,092	-26914,656	-34091,974	-44458,397	-59628,718	-82206,231	-116469,89	-169599,25	-253902,75	-390956,82	-12622712	-1010476,2	-1697657,4	-2938623	-5242476,8	-9641160,3	
Kumulované CF	-28800000	-28813522	-28827968,17	-28843989	-28862405	-28884312	-28911227	-28945319	-28989777	-29049406	-29131612	-29248082	-29417681	-29671584	-30062541	-42685253	-43695729	-45393387	-48332010	-53574486	-63215647	
DCF	-28800000	-12877,94	-13103,25464	-13838,992	-15151,192	-17164,78	-20084,13	-24228,529	-30091,193	-38437,203	-50467,495	-68097,532	-94439,207	-134650,05	-197459,76	-6071740,5	-462910,81	-740682,28	-1221058,5	-2074626,1	-3633651,9	
Kumulované DCF	-28800000	-28812878	-28825981,19	-28839820	-28854971	-28872136	-28892220	-28916449	-28946540	-28984977	-29035445	-29103542	-29197981	-29332631	-29530091	-35601832	-36064743	-36805425	-38026483	-40101109	-43734761	

Výdajové NPV -43 734 761,37 Kč