

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Katedra elektroenergetiky



**Akumulace elektrické energie pro dobíjení  
elektromobilů v kombinaci s obnovitelným  
zdrojem energie**

**Electric Energy Accumulation with Renewable  
Source for Electric Vehicle Charging**

*Diplomová práce*

**Bc. Jan Linhart**

**Praha 2020**

*Vedoucí práce:* Ing. Mgr. Vít Klein, Ph.D.  
*Studijní program:* Elektrotechnika, energetika a management  
*Studijní obor:* Elektroenergetika



## **Prohlášení**

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

V Praze dne 18. 5. 2020

.....  
Bc. Jan Linhart



## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. Mgr. Vítu Kleinovi, Ph.D., za odborné rady a konzultace, bez kterých by tato práce nevznikla. Dále děkuji společnosti Pražská energetika za poskytnuté informace a data k jejich dobíjecí stanici.



## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Linhart** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **457027**  
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 elektrické energie pro dobíjení elektromobilů v kombinaci s obnovitelným zdrojem energie.**

Název diplomové práce anglicky:

**Electric Energy Accumulation with Renewable Source for Electric Vehicle Charging.**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Přehled vhodných technologií pro akumulaci elektrické energie.
- 2) Posouzení současné dobíjecí stanice využívající akumulaci a obnovitelný zdroj elektrické energie v ČR.
- 3) Návrh optimálního systému akumulace v kombinaci s obnovitelným zdrojem elektrické energie pro dobíjení elektromobilů.
- 4) Vyhodnocení navrženého systému.

Seznam doporučené literatury:

1. ČSN EN 50160 - Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejných distribučních sítí.
2. Kodexy provozovatelů přenosové a distribučních elektrizačních soustav.
3. MASTNÝ, Petr. Obnovitelné zdroje elektrické energie. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04937-2.

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: **10.02.2020**

Termín odevzdání diplomové práce: \_\_\_\_\_

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2021**

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

\_\_\_\_\_  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta





## **Anotace**

Diplomová práce se zabývá návrhem ultrarychlé dobíjecí stanice se šesti stojany pro souběžné dobíjení až dvanácti vozidel. Stanice využívá lokální obnovitelný zdroj elektrické energie v podobě fotovoltaické elektrárny na střeše. Dále je vybavena akumulacním systémem pro pokrytí výkonových špiček odběru, řízení napětí a účinníku a tím snížení nároků na distribuční soustavu v místě připojení. Samotné uspořádání a provoz stanice jsou navrženy a pomocí simulačního programu otestovány na očekávaný rozvoj elektromobility a poptávky po dobíjení v horizontu let 2020 až 2040.

## **Klíčová slova**

akumulační systém, akumulátor, distribuční soustava, dobíjecí stanice, elektromobil, elektromobilita, fotovoltaická elektrárna, rezervovaný příkon, špičkový odběr, veřejná dobíjecí infrastruktura

## **Summary**

This diploma thesis deals with the design of an ultra-fast charging station with six chargers for simultaneous charging of up to twelve vehicles. The station uses a local renewable source of electricity in the form of a photovoltaic power plant on the roof. Furthermore, it is equipped with an energy storage system for shaving load peaks, voltage and power factor control and thus reduce the demands on the distribution system at the connection point. The layout and operation of the station are designed and tested using a simulation program for the expected increase of electromobility and the demand for charging in the period 2020 to 2040.

## **Keywords**

battery, charging station, distribution system, electric vehicle, electromobility, energy storage system, peak load, photovoltaic power plant, public charging infrastructure, reserved capacity



## Obsah

Úvod.....	13
1 Možnosti akumulace elektrické energie.....	15
1.1 Základní parametry.....	16
1.2 Elektrochemické akumulátory .....	18
1.2.1 Olovené akumulátory (Pb).....	18
1.2.2 Nikl-kadmiové akumulátory (NiCd).....	20
1.2.3 Nikl-železné akumulátory (NiFe) .....	21
1.2.4 Nikl-metal hydridové akumulátory (NiMH) .....	22
1.2.5 Nikl-zinkové akumulátory (NiZn) .....	23
1.2.6 Nikl-vodíkové akumulátory (NiH).....	23
1.2.7 Lithium-iontové akumulátory (Li-ion).....	23
1.2.8 Porovnání běžně používaných akumulátorů .....	27
1.2.9 Sodík-sírové (NaS) a Sodík-chlorid nikelnaté (Na-NiCl <sub>2</sub> ) akumulátory .....	28
1.2.10 Zinek-vzduch baterie .....	29
1.2.11 Stříbro-zinkové akumulátory (AgZn) .....	30
1.2.12 Porovnání alternativních akumulátorů .....	31
1.2.13 Průtokové akumulátory.....	31
1.2.14 Nadějně budoucí akumulátory .....	32
1.2.15 Porovnání nadějných budoucích akumulátorů .....	35
1.3 Chemický systém akumulace .....	36
1.3.1 Palivový článek .....	36
1.4 Elektrický systém akumulace .....	37
1.4.1 Superkapacitory .....	37
1.4.2 Porovnání systémů odlišných od běžných akumulátorů.....	39
1.5 Magnetický systém akumulace .....	39
1.5.1 Supravodivé cívky .....	39
1.6 Mechanický systém akumulace .....	41
1.6.1 Setrvačníky .....	41
1.7 Shrnutí .....	44
2 Elektromobilita a dobíjecí infrastruktura .....	45
2.1 Současný stav elektromobility .....	45
2.2 Očekávaný rozvoj elektromobility.....	50
2.3 Současný stav dobíjecí infrastruktury .....	52

2.4	Očekávaný rozvoj dobíjecí infrastruktury .....	55
2.5	Rozložení časů zahájení dobíjení EV.....	57
2.6	Dobíjecí charakteristiky EV .....	58
2.7	Základní pravidla pro připojení a paralelní provoz vzhledem k DS, měření a vyhodnocování el. energie .....	59
3	Dobíjecí stanice s akumulací a fotovoltaickou elektrárnou společnosti PRE.....	67
3.1	Základní popis .....	67
3.2	Popis hlavních komponent systému.....	69
3.3	Změřené průběhy .....	72
3.4	Shrnutí .....	74
4	Vlastní návrh dobíjecí stanice.....	76
4.1	Umístění a odhad denní vytíženosti dobíjecí stanice .....	76
4.2	Základní komponenty systému .....	79
4.2.1	Dobíjecí stojan.....	79
4.2.2	Akumulační systém .....	82
4.2.3	Návrh fotovoltaické elektrárny .....	86
4.3	Simulační program .....	93
4.4	Návrh optimálního uspořádání zařízení dobíjecí stanice.....	98
4.5	Ověření schopnosti provozu navrženého uspořádání .....	102
	Závěr .....	122
	Seznam symbolů a zkratk .....	124
	Seznam použité literatury .....	126
	Seznam obrázků .....	128
	Seznam tabulek .....	130
	Seznam příloh .....	131
	Přílohy.....	132

## Úvod

V posledním desetiletí dochází k výraznějšímu rozvoji elektromobility. Po celém světě si elektromobily postupně proráží cestu a tím se zařazují po boku vozidel se spalovacími motory. Hlavním důvodem jejich produkce je postupný přechod na tzv. alternativní pohony. Snahou je snížit závislost na ropě. Přestože ropy je ještě stále více než dost, přeci jenom jí je omezené množství, a je tak potřeba myslet na budoucnost, protože v některých odvětvích je ropa pro své vlastnosti doposud nenahraditelná, např. chemický průmysl a výroba léčiv. Dalším důvodem přechodu na alternativní pohony je snižování emisí skleníkových plynů, hlavně oxidu uhličitého (CO<sub>2</sub>). V Evropské unii aktuálně začíná platit povinnost výrobců osobních vozidel držet průměrné emise ze všech prodaných vozidel pod hranici 95 g CO<sub>2</sub> na jeden kilometr. Tato hodnota se bude dále postupně snižovat a za její nedodržení hrozí automobilkám vysoké pokuty. Již je jasné, že nejvíce se budou rozšiřovat elektromobily, na které sází hlavně Evropská unie. Elektromobily se z tohoto pohledu berou jako bezemisní. Během jízdy skutečně neprodukují žádné emise výfukových plynů a s jejich využíváním dochází ke snižování produkce CO<sub>2</sub> v dopravě. Toto je velmi výhodné pro dopravu hlavně ve městech s velkou hustotou provozu, kde pomůžou k výraznému zlepšení kvality ovzduší. Za celý životní cyklus, včetně výroby elektrické energie pro dobíjení, výroby a následné likvidace akumulátorů a celkově výroby vozidel, rozhodně produkce skleníkových plynů, mezi které CO<sub>2</sub> patří, nulová není. Elektromobily se stávají ekologičtějšími než vozidla se spalovacími motory po ujetí určitého množství kilometrů, jejichž počet se odvíjí od využívaného zdroje elektrické energie pro dobíjení. Pokud bychom dokázali naplno využít potenciál obnovitelných zdrojů elektrické energie, tak by samozřejmě byly elektromobily bezesporu výhodnějšími. Elektrifikace dopravy přispívá kromě snižování emisí, zvyšování podílu obnovitelných zdrojů energie, také ke zvyšování energetické účinnosti.

Elektromobily mají v porovnání s konvenčními automobily některé nedostatky, např. déle trvající nabíjení, omezený dojezd, vysoké pořizovací náklady dány hlavně cenou akumulátorů, vyšší hmotnost vozu, málo rozsáhlá infrastruktura veřejných dobíjecích stanic. Nicméně dochází k postupnému omezování těchto nedostatků. Pro někoho mohou být zajímavé naopak výhody, které elektromobily poskytují. Jedná se o možnost nabíjení doma (s využitím lokálně vyrobené elektrické energie fotovoltaickými moduly), velmi vysoká akcelerace, rekuperace energie při zpomalování a celkově moderní technologie a funkcionality, které některé elektromobily nabízejí již v základu. Důvody, proč nejsou prosazovány vozy na vodíkový pohon, jsou některé jejich další problémy oproti elektromobilům. Např. energeticky náročná výroba vodíku elektrolýzou, kdy celková účinnost od spotřebované elektřiny na výrobu vodíku, až k zpětné výrobě elektřiny ve voze, je zhruba poloviční z pohledu ujetých kilometrů oproti čistým elektromobilům. Dalším problémem je taktéž vysoká cena těchto vozů, zároveň jsou i vyšší provozní náklady za palivo a údržbu a v neposlední řadě v ČR v současné době není jediná veřejná čerpací stanice na vodík.

Omezená rychlost dobíjení a dojezd elektromobilů, jsou negativy, které odrazují od pořízení elektromobilů. Proto se chci v této práci podívat na provoz ultrarychlé dobíjecí stanice, která umožní současně rychlé dobíjení několika vozidel. Problémem u ultrarychlé dobíjecí stanice je nárazový odběr vysokého výkonu, který může působit problémy v distribuční soustavě. Proto se zaměřím na možnost kompenzace vysokých odběrů pomocí akumulačního zařízení, které může také posloužit ke snížení požadovaného příkonu přípojky k dobíjecí lokalitě. Aby s postupným rozšiřováním elektromobility nedocházelo k možnému zatěžování distribuční soustavy, je vhodné vytvářet také decentralizované zdroje elektrické energie, která se bude vyrábět přímo v místě spotřeby. Na střechě dobíjecí stanice tak budou umístěny fotovoltaické moduly pro lokální výrobu obnovitelné elektrické energie.

V první části této práce uvedu přehled různých vhodných možností akumulace elektrické energie, dále popíšu podobnou dobíjecí stanici, která je již v České republice v provozu. V poslední části vytvořím návrh ultrarychlé dobíjecí stanice a její provoz odsimuluji v softwaru Matlab Simulink.

# 1 Možnosti akumulace elektrické energie

K uchování elektrické energie lze využít několik různých akumulacních systémů (elektrické, elektrochemické, chemické, mechanické, tepelné atd.). Nebudou zde popsány všechny možné způsoby, např. přečerpávací vodní elektrárny, tepelná akumulace do roztavených solí a podobně. Zaměřím se hlavně na technologie, které lze s výhodou využívat lokálně v místech umístění dobíjecích stanic a zajistit tak požadovaný příkon pro dobíjení elektromobilů. Největší část bude věnována pravděpodobně nejvhodnějšímu typu, kterým jsou elektrochemické zdroje. Ty se dělí na primární články, sekundární články a palivové články. V primárním článku dochází při vybíjení k nevratné přeměně materiálu elektrod. Po jeho vybití, tedy poklesu napětí pod hodnotu, která je již nedostatečná pro správnou funkci elektrického obvodu, který je článkem napájen, se článek již nedá znovu dobít a stává se odpadem. Naopak sekundární článek, umožňuje vratnou změnu mezi elektrickou a chemickou formou energie a lze ho opakovaně používat. V palivovém článku dochází k elektrochemickým procesům, kde se z nepřetržitě dodávaných reagujících látek přeměňuje chemická energie na energii elektrickou.

Elektrochemický článek je složen z kladné a záporné elektrody, elektrolytu, nádoby, pólových vývodů a obvykle separátoru. Elektrody jsou vodiči elektrického proudu, které slouží ke kontaktu s nekovovými částmi obvodu (elektrolyt, polovodič, vakuum, prostor naplněný plynem). Obsahují proudový kolektor (sběrač elektrického proudu) a aktivní materiál (při vybíjení článku chemicky reaguje a vytváří el. energii). Elektroda, na které probíhá oxidace (ztráta elektronů) aktivní hmoty se nazývá anoda. Elektroda, na které je aktivní hmota redukována (zisk elektronů) se nazývá katoda. V případě primárních článků je anoda zápornou elektrodou a katoda elektrodou kladnou. Co se týče sekundárních článků, tak bez udání směru toku proudu (nabíjení nebo vybíjení) je takovéto označení nejednoznačné a pro zjednodušení se často uvádí pouze výrazy kladná elektroda a záporná elektroda. Při nabíjení totiž na kladné elektrodě dochází k oxidaci, tato elektroda je tedy anodou, a záporná elektroda je katodou. Při vybíjení naopak dochází na kladné elektrodě k redukci a tato elektroda je katodou, a záporná elektroda je anodou. Elektrolyt může být tekutý, pevný nebo gelový. Obsahuje pohyblivé ionty, čímž je iontově vodivý. Zprostředkováním transportu nábojů umožňuje vedení proudu. Nádoba je obvykle kovová, typicky válcového tvaru (ale ne vždy) a slouží k uzavření článku. Separátor je vyroben z materiálu prostupného pro ionty, elektricky však vzájemně odděluje obě elektrody, ale současně umožňuje kontakt elektrod s elektrolytem.

Primární a sekundární články mají zpravidla malé napětí, v řádu jednotek voltů, které je dáno elektrochemickými potenciály použitých materiálů. Abychom získali vyšší napětí, řadí se jednotlivé články sériově. Celkové výstupní napětí je poté dáno součtem napětí jednotlivých článků, celková kapacita je dána kapacitou článku s nejmenší hodnotou této veličiny. Paralelní kombinace je vhodná pro dosažení vyšších proudů nebo dosažení delší vybíjecí doby, tedy vyšší kapacity. Paralelně lze spojit pouze články se shodným napětím.

Sériovým, paralelním nebo kombinovaným spojením jednotlivých primárních článků vznikne baterie. Baterii je nazýván i jeden primární článek, který je navíc opatřen etiketou nebo zabalen do folie a má pólové vývody. V případě spojení sekundárních článků, nebo doplnění jednoho článku o etiketu a pólové vývody, mluvíme o akumulátoru (akumulátorové baterii). Dále se budu zabývat pouze akumulátory, které lze opakovaně nabíjet a vybíjet a využívat je k akumulaci elektrické energie.

[8]

## 1.1 Základní parametry

### Napětí [V]

**Jmenovité** napětí akumulátoru se odvíjí od sériové, případně sério-paralelní kombinace jednotlivých článků. Jmenovité napětí článků je dle použité technologie stanoveno normou (např. 1,2 V u NiCd a NiMH akumulátorových článků a 3,6 V u Li-ion akumulátorového článku). **Pracovní** (skutečné) napětí, které je změřeno na svorkách akumulátoru, se mění v závislosti na provozních podmínkách (teplota, stav nabití, směr a velikost protékajícího proudu atd.). Pro nezatížený akumulátor naměříme tzv. napětí **naprázdno**. Pro akumulátory může být dále stanoveno **maximální** nabíjecí napětí, které nesmí být překročeno, a **minimální** vybíjecí napětí, pod které nesmí být akumulátor vybit. V případě překročení těchto mezí by mohlo dojít k trvalému poškození akumulátoru.

### Kapacita [Ah], [kWh]

Kapacita článku nebo akumulátoru udává elektrický náboj ( $1\text{ C} = 1\text{ As}$ ), který lze získat za stanovených podmínek vybíjení. Obvykle se udává v ampérhodinách (Ah). Velikost představuje počet hodin, po které může akumulátor dodávat proud o určité velikosti. V případě vynásobení kapacity v Ah výstupním napětím akumulátoru, získáme kapacitu vyjádřenou ve Wh, případně kWh. Opět je třeba rozlišovat jmenovitou a skutečnou hodnotu kapacity. Skutečná kapacita je závislá na konkrétních podmínkách a může se měnit, např. v závislosti na stáří akumulátoru, teplotě, velikosti nabíjecího proudu nebo velikosti konečného vybíjecího napětí.

Jmenovitá kapacita (C5) udává hodnotu kapacity, kterou může akumulátor dodat při vybíjení po dobu pěti hodin do dosažení konečného vybíjecího napětí. Vybíjecí proud v tomto případě má hodnotu v ampérech číselně rovnu dvaceti procentům jmenovité kapacity (0,2C). Obdobně může být stanovována kapacita C10, C20 apod.

### C-rate [-]

Udává velikost vybíjecího nebo nabíjecího proudu v ampérech, která je číselně rovna násobku nebo zlomku jmenovité kapacity akumulátoru v Ah. Například proud pro kapacitu 20 Ah pro C-rate 0,1 je roven 2 a C-rate 5C je roven 100 A.

### Měrná energie, energetická hustota [ $\text{Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$ ], [ $\text{Wh}\cdot\text{m}^{-3}$ ], [ $\text{Wh}\cdot\text{l}^{-1}$ ]

Vyjadřuje množství elektrické energie, kterou je schopen akumulátor uložit vzhledem k jeho hmotnosti nebo objemu. Pro aplikace, kde se akumulátor přemísťuje je vhodnější využívat měrnou energii vztahenou k jednotce hmotnosti (elektromobily). Pro statické umístění akumulátorů je naopak výhodnější porovnávat energetickou hustotu, která je vztahena k jednotce objemu, kdy její hmotnost není tak důležitá (velkokapacitní akumulátorová uložistě). Měrná energie je využívána hlavně pro vzájemné porovnávání jednotlivých technologií akumulátorů.

### Stav nabití SoC (State of Charge) [%]

Aktuální stav nabití akumulátoru vyjádřený v procentech jmenovité kapacity. Vyjadřuje množství elektrické energie, kterou lze z akumulátoru ještě získat.



## Hloubka vybití DoD (Depth of Discharge) [%]

Reprezentuje procentuální množství z celkové kapacity akumulátoru, které bylo již z akumulátoru odčerpáno. DoD je opačnou veličinou k SoC. Je-li např. DoD 40 %, akumulátor je nabit na SoC 60 %.

## Životnost [počet cyklů], [rok]

V rámci akumulátorů se může životnost udávat časem, počtem cyklů nabíjení a vybíjení nebo úrovní kapacity (Ah). Obvykle se udává počtem normalizovaných cyklů nabíjení a vybíjení, který je akumulátor schopen vykonat do okamžiku, než klesne jeho kapacita pod stanovenou mez (End of Life (EoL), např. 80 % počáteční kapacity). Počet cyklů je výrazně závislý na provozních podmínkách, hlavně DoD (čím menší je hloubka vybití, tím je vyšší počet cyklů), teplotě (nabíjení při teplotách pod bodem mrazu nebo přebíjení při vysokých teplotách vedou k razantnímu snížení životnosti), velikosti nabíjecího proudu a hodnotě přebíjení (pokračující nabíjení plně nabitého akumulátoru). Reálný počet cyklů se tak může značně lišit od hodnoty, kterou deklaruje výrobce (v minusovém i plusovém počtu).

## Účinnost [%]

### **Coulombická účinnost (proudová účinnost, ampérhodinová účinnost)**

Poměr elektrického náboje vybitého z akumulátoru k elektrickému náboji dodanému během předchozího nabíjení.

Nejvyšší coulombickou účinnost mají Li-ion akumulátory a může přesahovat až 99 %, ale pouze při přiměřeném proudu a nízkých teplotách. Při ultrarychlém nabíjení je účinnost nižší kvůli ztrátám, které se mění na teplo. Velmi pomalé nabíjení je také z pohledu účinnosti nevhodné, protože se uplatňuje samovybíjení akumulátoru. U olověných akumulátorů se účinnost pohybuje okolo 90 %. Při rychlém nabíjení NiCd a NiMH akumulátorů lze dosáhnout účinnosti 90 %, ale při pomalém nabíjení pouze 70 %. Účinnost také klesá při překročení 70 % SoC, kdy se akumulátory zahřívají. Nejlepší účinnost lze dosáhnout při nabíjení, kdy SoC je v rozmezí 30-70 %.

### **Napěťová účinnost**

Poměr průměrného napětí při vybíjení k průměrnému napětí při nabíjení. Ke ztrátám dochází, protože nabíjecí napětí je vždy vyšší než jmenovité napětí z nutnosti aktivace chemické reakce v akumulátoru.

### **Energetická účinnost**

Poměr elektrické energie odebrané z akumulátoru při vybíjení k elektrické energii dodané do akumulátoru při předchozím nabíjení.

Energetická účinnost Li-ion akumulátoru je nižší než coulombická účinnost a vztahuje se k hodnotě nabíjecího a vybíjecího proudu (C-rate). Při 20hodinovém nabíjecím proudu 0,05C je energetická účinnost 99 %. Klesá přibližně na 97 % při nabíjení 0,5C a dále se snižuje při vyšším nabíjecím proudu.

## Teplota

Optimální provozní teplota většiny akumulátorů je v rozmezí 5-25 °C. Při pokojové teplotě lze obecně dosáhnout nejvyšší účinnosti nabíjení. U akumulátorů jsou udávána teplotní pásma, ve kterých mohou být vybíjeny. Dalším udávaným rozmezím jsou možné teploty pro nabíjení. Dobíjet nelze obecně

při nízký nebo naopak vysokých teplotách. Třetí teplotní interval může udávat přípustné teploty pro skladování akumulátorů (bez připojené zátěže).

[8], [9], [10]

## 1.2 Elektrochemické akumulátory

Rozdělení podle typu elektrolytu:

- s kyselým elektrolytem – olovené akumulátory
- s alkalickým elektrolytem (zásaditý, roztok hydroxidu draselného KOH) – NiCd, NiFe, NiMH
- s bezvodým elektrolytem – Li-ion

Rozdělení podle provedení:

- otevřené akumulátory
- uzavřené plynotěsné (hermetické) akumulátory

[8]

### 1.2.1 Olovené akumulátory (Pb)

Olovený akumulátor, který byl vynalezen roku 1859, byl prvním nabíjecím akumulátorem vhodným pro komerční využití. S ohledem na jeho úctyhodnou historii je stále jedním z nejrozšířenějších typů akumulátorů. Hlavní využití je díky jeho nízké ceně za Wh, spolehlivosti a schopnosti poskytovat vysoké nárazové proudy, v automobilech jako startovací akumulátorová baterie. Dále se využívá jako trakční akumulátor (golfové vozíky, manipulační technika – vysokozdvížné vozíky atd.) nebo staniční akumulátor (zdroj nepřerušovaného napájení (UPS) – nemocnice, telekomunikační systémy, systémy s FVE).

Kladná elektroda může být konstrukčně mřížková, tyčová nebo trubičková, tvořena z oxidu olovičitého. Záporná elektroda je tvořena mřížkou z houbovitého olova. Pro zlepšení mechanické pevnosti a elektrických vlastností se přidávají do elektrod pomocné látky, kterými jsou nejčastěji antimon, vápník, cín a selen. Elektrolytem je vodný roztok kyseliny sírové. Separátorem může být polypropylenová nebo polyvinylchloridová perforovaná zvlněná folie nebo porézní laminovaná skelná tkanina. Při vybíjení vzniká na obou elektrodách síran olovnatý, elektrolyt se mění na vodu. Nabíjením probíhají opačné chemické reakce.

Olovené akumulátory mají vysokou hmotnost a jsou méně odolné při hlubokém cyklovém vybíjení než akumulátory založené na niklu nebo lithiu. Každé plné vybití způsobuje namáhání a zároveň každý nabíjecí a vybíjecí cyklus trvale odebere část kapacity akumulátoru. Toto trvalé snížení kapacity je při dobrých provozních podmínkách malé, ale zvyšuje se při poklesu kapacity na polovinu nominální hodnoty. Toto opotřebování se obecně vyskytuje v různé míře u všech typů akumulátorů.

V závislosti na hloubce vybíjení poskytují olovené akumulátory přibližně 200-300 provozních cyklů. Primárními důvody poměrně nízkého počtu provozních cyklů jsou koroze mřížky na kladné elektrodě, vyčerpání aktivního materiálu a expanze kladných desek. Vysoké teploty a vysoký vybíjecí proud ještě více podporují stárnutí.

Nabíjení je jednoduché, ale je nutno dodržet správné limity napětí. Nízká hladina napětí chrání baterii, ale produkuje slabý výkon a způsobuje sulfataci na záporné elektrodě (vznik krystalů síranu olovnatého, vrátný jev). Vysoká hladina napětí naopak zlepšuje výkon, nicméně způsobuje korozi mřížky na kladné elektrodě, která je trvalá. Nabíjecí charakteristika olovených akumulátorů je typu IU, kdy se v první fázi nabíjí konstantním proudem a napětí postupně stoupá až do hodnoty plynování (2,4 V na článek), poté se přejde do druhé fáze nabíjení s konstantním napětím. V první fázi lze do akumulátoru uložit 60-80 % kapacity. V druhé fázi klesá nabíjecí proud a tím se také výrazně zpomaluje ukládání další energie do akumulátoru. Při optimálním nabíjecím proudu 0,1-0,2C může nabíjení trvat přibližně 16 h.

[8], [10], [11]

Obecně udávaná teplota provozu olovených akumulátorů je -20 až 50 °C, jak pro vybíjení, tak i pro nabíjení. Pb akumulátory lze tedy dobíjet i pod bodem mrazu, nesmí být ale překročen nabíjecí proud 0,3C. Při nízkých teplotách dochází u všech typů akumulátorů k nárůstu vnitřního odporu a tím k výraznému prodloužení doby nabíjení.

Postupem času došlo k různým modifikacím olovených akumulátorů a tím ke zlepšení některých nevýhodných vlastností akumulátorů se zaplavenými elektrodami. Vznikly bezúdržbové uzavřené akumulátory s přetlakovými ventily (VRLA – Valve Regulated Lead Acid). Ventily umožňují při nárůstu tlaku vypuštění plynů, které vznikají při rychlém nabíjení nebo vybíjení. Tyto akumulátory obsahují méně elektrolytu, který může být ve formě gelu nebo absorbován ve speciálním separátoru tvořeném skelnými vlákny (AGM – absorbent glass mat). Nedochozí k vysoušení v průběhu cyklů, není nutné dolévat destilovanou vodu, a navíc je možné akumulátor provozovat v jakékoli poloze bez úniku elektrolytu. AGM akumulátory mají v porovnání s akumulátory se zaplavenými elektrodami vyšší pořizovací náklady, nicméně akumulátory s gelovým elektrolytem jsou ještě dražší. Menší VRLA akumulátory s kapacitou do 30 Ah se nejčastěji používají pro malé UPS, nouzové osvětlení, invalidní vozíky nebo pro zdravotní péči v nemocnicích. Větší VRLA akumulátory se používají jako záložní zdroje pro telefonní vysílače, internetové rozbočovače, banky, nemocnice apod. AGM akumulátory nejsou vhodné pro velké systémy UPS, ale díky rychlejšímu nabíjení, vyšší cyklové životnosti a hlavně možnosti poskytovat vyšší zátěžné proudy, se uplatnily převážně jako startovací akumulátory pro motocykly, automobily s funkcí start-stop nebo hybridní vozy.

[10]

Tab. 1-1 Výhody a nevýhody olovených akumulátorů [8], [10], [11]

Výhody	Nevýhody
Spolehlivý provoz v širokém rozsahu teplot (možnost nabíjení i pod bodem mrazu)	Hlubokým vybíjením se snižuje životnost a kapacita
Velký měrný výkon (vysoký vybíjecí proud)	Nízká měrná energie
Nízké samovybíjení	Pomalé nabíjení
Snadná výroba	Omezená životnost počtem cyklů
Zvládnutá recyklovatelnost	Nutnost uskladnění v nabitém stavu
Nízká cena za Wh	Toxicita olova a kyseliny sírové
	Údržba (typ se zaplavenými elektrodami)
	Omezená poloha uložení (typ se zaplavenými elektrodami)

## 1.2.2 Nikl-kadmiové akumulátory (NiCd)

NiCd akumulátory byly nejvíce využívanými alkalickými akumulátory v přenosných zařízeních, ale v 90. letech minulého století je začaly nahrazovat NiMH a následně Li-ion akumulátory. Elektrody můžou být deskového provedení, nebo pro menší kapacity ve tvaru svinutých pásků. Nosná konstrukce desek elektrod je z oceli, na které je v nabitém stavu v případě kladné elektrody aktivním materiálem oxid niklitý a na záporné elektrodě kovové kadmium. Při vybíjení vlivem chemických reakcí přechází aktivní prvek na kladné elektrodě na hydroxid nikelnatý a na záporné elektrodě na hydroxid kademnatý. Elektrolytem je většinou vodný roztok hydroxidu draselného (KOH) s přídavkem asi 5 % hydroxidu lithného (LiOH). Na rozdíl od kyselého elektrolytu v olověných akumulátorech, zde má alkalický (zásaditý) elektrolyt funkci pouze přenosu iontů a nedochází k jeho chemickým změnám, ani znehodnocování. Separátor je z inertních pórovitých materiálů z plastů nebo skelných vláken. Provedení hermetických akumulátorů se dělí na válcové, knoflíkové a prizmatické (hranolové). Jmenovité napětí článku je 1,2 V. V porovnání s olověným akumulátorem se životnost s rostoucí teplotou snižuje méně. S narůstajícím vybíjecím proudem dochází k většímu úbytku napětí a do dosažení konečného napětí článku se podaří z článku získat méně energie než při pomalejším vybíjení menším proudem.

Využití může být v široké škále aplikací, např. pro dlouhodobé zálohovací systémy (nouzové osvětlení, telekomunikační zařízení), pro nepravidelné odběry malých a velkých proudů (osvětlení operačních sálů, plošinové vozíky), pro dodávku velkých proudů v krátkém čase (startování spalovacích motorů, otevírání dveří v tramvajích). Dále díky jejich vysoké odolnosti a spolehlivosti jsou stále využívány v leteckém průmyslu. Jejich největší oblastí použití byly přenosné spotřebiče (mobilní a outdoorová zařízení, ruční nářadí). Dnes je s ohledem na toxicitu kadmia prodej komerčních NiCd akumulátorů zakázaný.

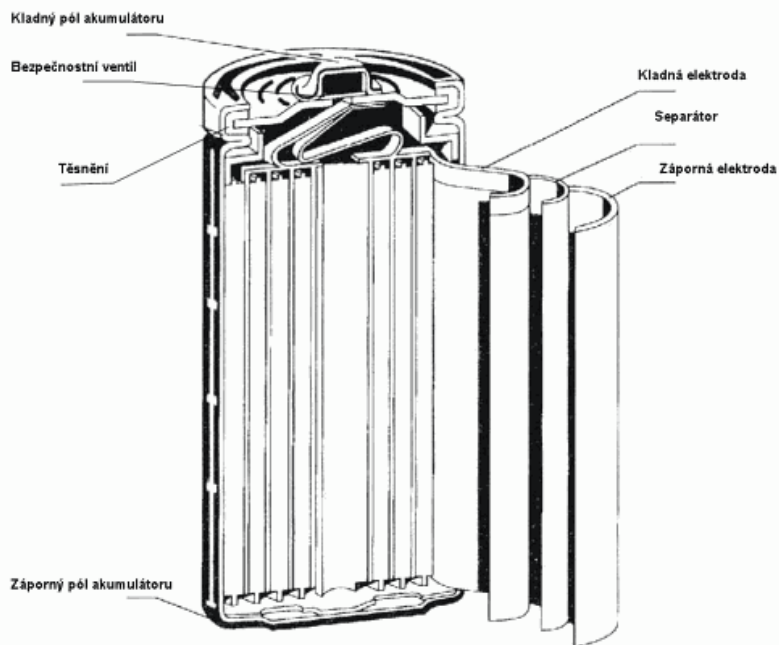
U NiCd akumulátorů vzniká tzv. paměťový efekt při opakovaném vybíjení (50-100krát) na malou a vždy stejnou hloubku vybití. Vznikají tak změny krystalové struktury záporné elektrody. Tento jev je reverzibilní a lze ho snadno odstranit úplným vybitím akumulátoru. Paměťový efekt se může vyskytovat pouze u akumulátorů, kde je elektrochemicky aktivní složkou záporné elektrody kadmium. Paměťový efekt se projevuje vznikem druhého vybíjecího stupně, což je náhlý pokles napětí článku zhruba o 50 až 100 mV, při tom nedochází k poklesu kapacity článku.

Dále se může projevit jev zdánlivého snížení kapacity akumulátoru při nabíjení ne zcela vybitého akumulátoru. Jedná se hlavně o nedokonalost nabíjecího cyklu standardními nabíječkami, které ukončí nabíjení při dosažení konečného nabíjecího napětí. Z důvodu vyššího napětí ne zcela vybitého akumulátoru oproti tomu vybitému, se nabíjení ukončí dříve, než je dosaženo plné kapacity. Tento jev lze vyrušit několika cykly plného vybití a nabití.

Válcové hermetizované NiCd i NiMH akumulátory se nabíjejí konstantním proudem. Nabíjení se ukončuje buď po stanovené době nabíjení, podle teploty nebo podle napětí. Nabíjení otevřených akumulátorů je obdobné jako u olověného akumulátoru.

Pokud se v nabíjení pokračuje i po plném nabití, dochází k přebíjení a začne se rozkládat elektrolyt. Vznikající kyslík a vodík jsou u otevřených akumulátorů odváděny do okolí. V uzavřených akumulátorech je zajištěn proces rekombinace, kdy vznikající kyslík na kladné elektrodě je vázán zápornou elektrodou, a na venek se akumulátor při přebíjení projevuje pouze zahříváním.

[8], [10], [11]



Obr. 1-1 Konstrukce jednočlánekového válcového akumulátoru [8]

Tab. 1-2, Výhody a nevýhody NiCd akumulátorů [8], [10]

Výhody	Nevýhody
Výborné mechanické vlastnosti (odolnost)	Poměrně nízká měrná energie
Možnost rychlého a velmi rychlého nabíjení	Vysoké samovybíjení
Možnost odběru vysokých proudů	Paměťový efekt
Poměrně vysoký počet provozních cyklů a dlouhá životnost v rocích	Vyšší požadavky na údržbu
Snášejí dlouhodobý stav vybití (po nabití obnovení kapacity)	Nízké napětí článku (větší počet článků v sérii)
Široký rozsah provozních teplot (vybíjení -40 až 70 °C, nabíjení 0 až 40 °C), dobrý výkon při nízkých teplotách	Náhlý pokles napětí v závěru vybíjení
Relativně malá změna napětí v průběhu vybíjení (strmý pokles v závěru vybíjení)	Toxicita kadmia
Univerzálnost použití	
Nízká cena z hlediska nákladů na cyklus	

### 1.2.3 Nikl-železné akumulátory (NiFe)

Nejstarším typem z prakticky použitelných alkalických akumulátorů. Vyráběly se jako otevřené akumulátory ve větší míře před druhou světovou válkou, poté byly nahrazeny v mnoha parametrech výhodnějšími NiCd akumulátory. Aktivním materiálem kladné elektrody je oxid niklitý, záporná elektroda je z porézního železa. Elektrolytem je hydroxid draselný. Konstrukce je téměř shodná s NiCd akumulátorem. Jmenovité napětí článku je také 1,2 V. Akumulátory tohoto typu se nevyrábějí v hermetickém provedení.

Výhodou NiFe akumulátorů je odolnost vůči přebíjení a hlubokému vybíjení a v aplikacích s pohotovostním režimem můžou být v provozu klidně 20 let. Odolávají také vibracím a vysokým teplotám. Hlavní nevýhodou je vysoké samovybíjení (100 % za 6 měsíců) a vyšší vnitřní odpor, kvůli kterému se nehodí pro provoz pod bodem mrazu. Používaly se v těžebním průmyslu, v železniční signalizaci a ve stacionárních aplikacích. Dnes jsou vyráběny pro trakční účely v zemích, kde se těží vysoce čisté železné rudy. Provozní teplota je v rozmezí 0-45 °C. Nevýhodou je vysoká cena, která je přibližně čtyřikrát vyšší než u olovených akumulátorů a je v pořizovacích nákladech srovnatelná s Li-ion.

[8], [10], [11]

Tab. 1-3 Výhody a nevýhody NiFe akumulátorů [8], [10], [11]

Výhody	Nevýhody
Jednoduchá konstrukce	Nízká měrná energie
Dostupné materiály	Vysoké samovybíjení (100 % za 6 měsíců)
Vysoký počet cyklů (2 000-4 000) a zároveň vysoká životnost (20 let)	Vysoký vnitřní odpor
Odolné proti přebíjení, hlubokému vybíjení, vibracím a vysoké teplotě	Nízký výkon při nízkých teplotách
Snadná likvidace	Vysoká cena

#### 1.2.4 Nikl-metal hydridové akumulátory (NiMH)

NiMH akumulátory byly vyvinuty hlavně z důvodu náhrady škodlivého kadmia v NiCd akumulátorech. Aktivním materiálem záporné elektrody jsou slitiny kovů, které jsou schopny při nabíjení vytvářet hydridy, neboli vázat na sebe vodík vznikající při nabíjení. Používají se např. slitiny TiFe, ZnMn<sub>2</sub>, LaNi<sub>5</sub>, Mg<sub>2</sub>Ni a další. Zbytek konstrukce je obdobný s NiCd akumulátory. Tvarově se taktéž vyrábějí akumulátory válcové, hranolové (prizmatické) nebo knoflíkové. Uplatnění mají tam, kde byly dříve používány NiCd akumulátory, např. v telefonech, vysílačkách, kamerách, fotoaparátech, ručním nářadí, jako zálohovací zdroje v zařízeních výpočetní techniky nebo v elektrických kolech a skútrech. V současné době jsou nejrozšířenějším typem dobíjecích komerčních akumulátorů v provedení AAA, AA a jiných velikostech. Provozní teplota je obvykle -20 až 65 °C pro vybíjení a 0 až 45 °C pro nabíjení. Některé typy NiMH akumulátorů mohou být nabíjeny i pod bodem mrazu díky tomu, že dochází k zahřívání hned od začátku nabíjení (NiCd se zahřívá až při přebíjení), ale proudem velikosti maximálně 0,1C.

[8], [10], [11]

Tab. 1-4 Výhody a nevýhody NiMH akumulátorů [8], [10]

Výhody	Nevýhody
Vyšší měrná energie	Hluboké vybíjení a dlouhodobý stav vybití vedou k snížení kapacity a životnosti (skladovat nabitě)
Menší zátěž pro životní prostředí	Citlivé na přebíjení
Neprojevuje se paměťový efekt	Vysoké samovybíjení
Široký rozsah provozních teplot	Vyšší vnitřní impedance
	Zahřívání od počátku nabíjení nebo v při větší zátěži
	Menší rozsah klimatických a mechanických odolností
	Nízká coulombická účinnost (70 %)

### 1.2.5 Nikl-zinkové akumulátory (NiZn)

NiZn akumulátory se používaly v železničních vozech v první polovině 20. století. Obdobně jako NiCd, používají alkalický elektrolyt a niklovou elektrodu. Rozdíl je ve jmenovitém napětí článku, které dosahuje hodnoty 1,65 V. NiZn akumulátory se nabíjí konstantním proudem do napětí článku 1,9 V, nemohou být nabíjeny trvalým malým proudem, který by kompenzoval jejich samovybití a udržoval by je plně nabitě. Měrná energie je přibližně  $100 \text{ Wh} \cdot \text{kg}^{-1}$  a počet provozních cyklů 200-300. Nízký počet provozních cyklů byl způsoben růstem dendritů, které často způsobily elektrický zkrat. Vylepšení elektrolytu tento problém omezily a je znovu uvažováno o používání pro komerční využití.

[10]

Tab. 1-5 Výhody a nevýhody NiZn akumulátorů [10]

Výhody	Nevýhody
Vyšší měrná energie	Po nabití nemohou být trvale nabíjeny malým proudem (pro kompenzaci samovybití)
Vyšší napětí článku	Nízký počet provozních cyklů
Netoxické materiály, snadná recyklace	Vysoké samovybití
Vysoký výstupní výkon	
Široký rozsah provozních teplot	
Nízká cena	

### 1.2.6 Nikl-vodíkové akumulátory (NiH)

Problémy s nestabilitou kovů při vývoji NiMH akumulátorů způsobily posun směrem k vývoji NiH. Používají ocelovou nádobu pro uchování vodíku při tlaku 8,27 kPa. Článek obsahuje pevné niklové elektrody, vodíkové elektrody, plynové clony a elektrolyt, které jsou zapouzdřeny v tlakové nádobě. Jmenovité napětí článku je 1,25 V a měrná energie  $40-75 \text{ Wh} \cdot \text{kg}^{-1}$ . Díky vysoké životnosti, vlivem nízké koroze, i při plném vybíjení, širokým rozsahem provozních teplot a nízkém samovybití, jsou ideální pro satelitní použití. Nevýhodou je jejich vysoká cena, která se pohybuje v řádu tisíců dolarů za článek.

[10]

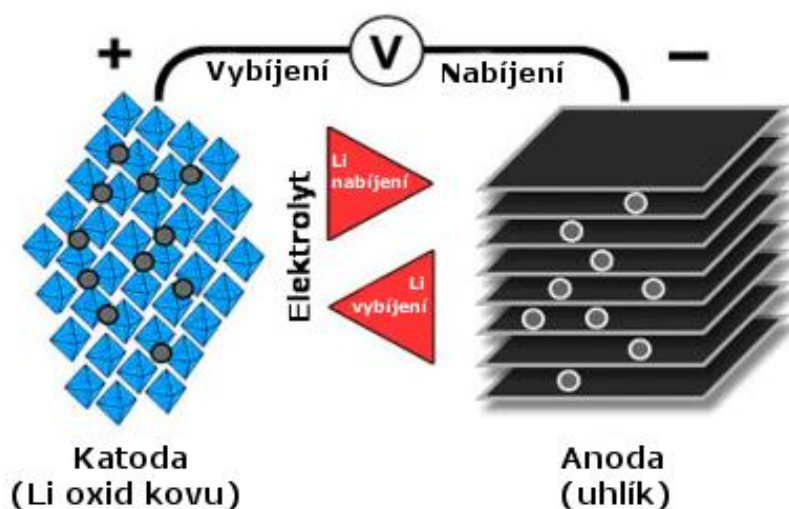
Tab. 1-6 Výhody a nevýhody NiH akumulátorů [10]

Výhody	Nevýhody
Vysoká životnost (i při plném vybíjení)	Nízká měrná energie
Malé samovybití	Vysoká cena
Široký rozsah provozních teplot (-28 až 54 °C)	

### 1.2.7 Lithium-iontové akumulátory (Li-ion)

Komerční rozšíření Li-ion akumulátorů nastalo v 90. letech 20. století, hlavně díky využívání v mobilních telefonech a další přenosné elektrotechnice. Aktivní hmotu kladné elektrody na hliníkovém proudovém kolektoru tvoří oxidy kovů. Převážně používanými materiály jsou oxid kobaltolithný ( $\text{LiCoO}_2$ ), oxid manganicitolithný ( $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ ), oxid nikelnatolithný ( $\text{LiNiO}_2$ ) nebo oxid vanadičitolithný ( $\text{LiV}_2\text{O}_5$ ), popř. další. Na rozdíl od kovového lithia jsou tyto oxidy na vzduchu stálé. Záporná elektroda je tvořena měděným proudovým kolektorem a porézním uhlíkovým materiálem (grafit). Jako elektrolyt se

používají lithiové soli, např. lithium hexafluorofosfát ( $\text{LiPF}_6$ ) nebo tetrafluoroboritan lithný ( $\text{LiBF}_4$ ), rozpuštěné v organickém rozpouštědle. Ionty lithia se při nabíjení přesouvají přes elektrolyt a separátor z kladné elektrody na zápornou a v případě vybíjení naopak ze záporné elektrody na kladnou. Výhodou oproti ostatním typům akumulátorů je, že ionty lithia se pouze vmísí do struktury záporné elektrody, nedochází tak k chemické reakci a lze dosahovat vysoké životnosti bez poklesu výkonu. Li-ion články mají vysoké jmenovité napětí 3,6 V (podle evropských norem, 3,7 V podle amerických norem). Li-ion akumulátory se vyrábějí válcové, hranolové (prizmatické) nebo knoflíkové. Elektrolyt může být kapalný, gelový nebo polymerový. V závěru vybíjení (DoD 80 %) dochází k rychlejšímu poklesu napětí. Maximální přípustná hodnota vybíjecího proudu se udává 5-6C. Se snižující se teplotou (hlavně pod  $0\text{ }^\circ\text{C}$ ) klesá kapacita akumulátoru a dostupný výkon. Pro životnost Li-ion akumulátorů platí, čím nižší hloubka vybití, tím vyšší počet cyklů. Z tohoto hlediska je přínosnější častější nabíjení.



Obr. 1-2 Pohyb iontů v Li-ion akumulátoru [10] (upraveno)

Výběr aktivních materiálů dává Li-ion akumulátorům unikátní vlastnosti. Nejběžnější jsou akumulátory na bázi  $\text{LiCoO}_2$  a také  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ . Využívají se jako zdroje pro notebooky, videokamery a další spotřebiče. Nejméně se v praxi vyskytují akumulátory  $\text{LiNiO}_2$ , které se používají jako speciální akumulátory hlavně v elektromobilech, hybridních automobilech a podobně.

Poměrně rozšířený je dnes i Li-ion akumulátor pod označením lithium-železo fosfát ( $\text{LiFePO}_4$ ), který má jmenovité napětí článku 3,2 V. Nejvíce se používá v akumulátorovém nářadí, pro pohony modelů, ale hlavní použití je v elektrických kolech a skútrech, elektromobilech a v hybridních vozech. Jeho předností je možnost odběru velkých proudů a je určen pro rychlé nabíjení. Snáší vysoké teploty, z hlediska bezpečnosti je bezproblémový, má nízké samovybíjení a vysokou životnost.

Akumulátory na bázi lithium-titan ( $\text{Li}_2\text{TiO}_3$ ) vykazují velký počet provozních cyklů, vysoký výstupní výkon, výborný výkon při nízkých teplotách a vyšší bezpečnost, ale měrná energie je nižší a zároveň je jejich cena vysoká.

Li-Polymerové akumulátory (Li-Pol) s pevným suchým polymerním elektrolytem se neuplatnily. Jejich nevýhodou byla špatná vodivost pevného polymeru při pokojové teplotě. Pro umožnění toku proudu bylo nutné akumulátor zahřát na teplotu vyšší než  $60\text{ }^\circ\text{C}$ . V moderních Li-polymerových akumulátorech je proto přidán elektrolyt v gelové formě, čímž je porézní separátor nahrazen mikroporézním elektrolytem. Tím lze články konstruovat tenčí. Li-Pol akumulátory mají oproti klasickým Li-ion



akumulátorům nižší hmotnost pro stejnou kapacitu, nemají kovový obal, jsou zabaleny jen v odizolované hliníkové fólii a lze je tvarovat dle potřeby. Tyto akumulátory se používají v mobilních telefonech a podobných zařízeních. Nevýhodou je možnost „nafouknutí“ akumulátoru v případě podvybití a při umístění uvnitř přístroje jeho poškození. Další nevýhodou je větší náchylnost na okolní klimatické podmínky (teplota) a mechanické namáhání.

Pro nabíjení Li-ion a Li-Pol akumulátorů se používá metoda CCCV (Constant Current followed by Constant Voltage). Z počátku probíhá nabíjení konstantním proudem, jehož doporučená maximální velikost je 0,7-0,8C, při nabíjení vyššími proudy se snižuje životnost akumulátorů. V první fázi lze dosáhnout nabití na 80 % kapacity během jedné hodiny. V druhé fázi nabíjení, která začíná okamžikem, kdy akumulátor dosáhne stanoveného napětí, probíhá nabíjení konstantním napětím a proud postupně klesá. Nabíjení se běžně ukončuje při poklesu proudu pod stanovenou mez, nicméně akumulátor by mohl zůstat nabíjen libovolně dlouhou dobu bez poškození. Rychlé nabíjení je u Li-ion akumulátorů povoleno v rozmezí teplot 5 °C až 45 °C, při teplotě pod 5 °C by měl být nabíjecí proud snížen. Pod bodem mrazu nabíjet nelze, z důvodu snížené difuze na záporné elektrodě. Na záporné elektrodě se může během nabíjení pod bodem mrazu objevit pokovení kovovým lithiem. To je trvalé a nelze jej odstranit pomocí cyklu. Díky vývoji již lze některé speciální typy akumulátorů nabíjet i pod bodem mrazu, ale pouze nízkým proudem. Běžný rozsah teplot při vybíjení je mezi -30 až 60 °C.

Každý článek, nebo paket několika článků musí být z bezpečnostních důvodů vybaven elektronickým spínačem, který články chrání před zvýšenou teplotou při namáhání. V případě, že by mohlo dojít k poškození činnosti je přerušen přívod proudu k článku. Ochranné obvody mohou chránit články také proti nadproudu, podpětí a přepětí.

[8], [10], [11]

Tab. 1-7 Výhody a nevýhody Li-ion akumulátorů [8], [10]

Výhody	Nevýhody
Vysoká měrná energie	Velice náchylné na přebíjení a podvybití (napětíové meze, při vybití pod povolenou mez dochází k trvalému zničení akumulátoru)
Vysoké napětí článku	Nutnost řídicí elektroniky (ochranný obvod)
Vysoký výstupní výkon	V průběhu vybíjení dochází k většímu poklesu napětí
Nízké samovybití	Vyšší vnitřní odpor (až 10krát větší než u NiCd)
Vysoká coulombická účinnost (až 99 %)	Nabíjecí proud omezen na 1,5C a vybíjecí na 2C
Dlouhá životnost (v cyklech i v rocích)	Nelze nabíjet rychle při teplotě pod bodem mrazu
Snadný algoritmus nabíjení a přiměřeně krátké doby nabíjení	Snížený výkon a kapacita při teplotách pod bodem mrazu
Lepší indikace SoC díky větší změně napětí	Degradují při vysokých teplotách a jsou-li skladovány při vysokém napětí článku
Nezávadné pro životní prostředí	Možnost požáru při poškození
Bezúdržbové	Vysoká cena za Wh (ale nízká cena za cyklus)

Je nutno podotknout, že uváděné parametry se berou jako obecné hodnoty, které se mohou navíc poměrně rychle měnit díky vývoji. Existují speciální typy akumulátorů, které mají některé vlastnosti lepší, na úkor jiných parametrů. Např. akumulátory se zvýšenou kapacitou, pro velké vybíjecí proudy, pro extrémní výkonové zatížení, pro extrémní teploty nebo pro trvalé dobíjení. Vždy je nutné brát ohled na parametry uvedené výrobcem pro jednotlivé akumulátory, hlavně dovozené rozsahy napětí.

Následující tabulka shrnuje vybrané parametry nejběžnějších Li-ion akumulátorů dle chemického složení aktivní hmoty kladné elektrody. LCO, LMO, NMC a NCA poskytují vysokou kapacitu díky vyššímu napětí a jsou používány převážně v přenosných zařízeních. LFP a LTO mají nižší napětí a kapacitu, ale jsou velmi odolné. Nejčastěji se používají v dopravních prostředcích a stacionárních aplikacích.

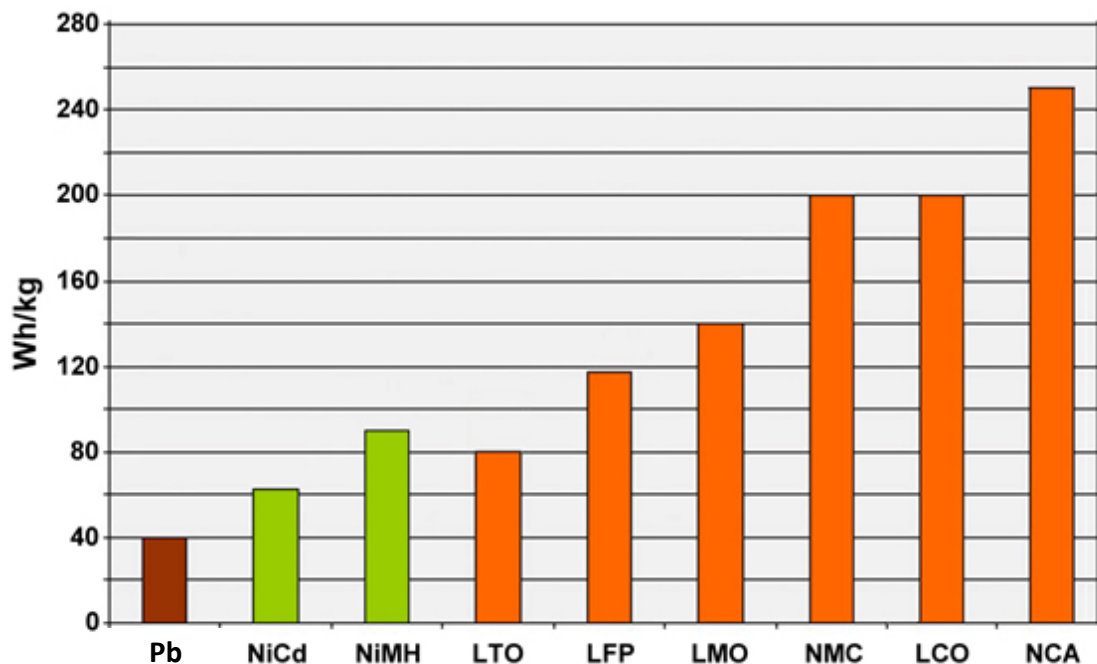
[10]

Tab. 1-8 Shrnutí nejběžnějších Li-ion akumulátorů (článků) [10]

Typ (chemické sl.) zkratka	LiCoO <sub>2</sub> (LCO)	LiMn <sub>2</sub> O <sub>4</sub> (LMO)	LiNiMnCoO <sub>2</sub> (NMC)	LiFePO <sub>4</sub> (LFP)	LiNiCoAlO <sub>2</sub> (NCA)	Li <sub>2</sub> TiO <sub>3</sub> (LTO)
Jmenovité napětí [V]	3,6	3,7 (3,8)	3,6 (3,7)	3,2; 3,3	3,6	2,4
Napětí při plném nabití [V]	4,2	4,2	4,2 (nebo vyšší)	3,65	4,2	2,85
Napětí při plném vybití [V]	3,0	3,0	3,0	2,5	3,0	1,8
Minimální napětí [V]	2,5	2,5	2,5	2,0	2,5	1,5
Měrná energie [Wh·kg <sup>-1</sup> ]	150-200	100-150	150-220	90-120	200-260	70-80
Nabíjecí proud (C-rate) [-]	0,7-1C (3h)	0,7-1C (3h)	0,7-1C (3h)	1C (3h)	1C	1C (max. 5C)
Vybíjecí proud (C-rate) [-]	1C (1h)	1C, (10C u některých článků)	1-2C	1C (25C u některých článků)	1C	10C (možné)
Počet cyklů (ideální)	500-1 000	300-700	1 000-2 000	1 000-2 000	500	3 000-7 000
Teplný lavinový jev [°C]	150 (vyšší při SoC 0 %)	250 (vyšší při SoC 0 %)	210 (vyšší při SoC 0 %)	270 (bezpečné i při SoC 100 %)	150 (vyšší při SoC 0 %)	Jedny z nejbezpečnějších Li-ion
Údržba	Udržovat teplotu, skladovat alespoň částečně nabitě, předcházet plným cyklům, používat přiměřený nabíjecí a vybíjecí proud					
Používané od roku	1991	1996	2008	1996	1999	2008
Aplikace	Mobilní telefony, tablety, laptopy, kamery	Ruční nářadí, zdravotnická technika, EV a hybridy	Elektrokola, zdravotnická technika, EV, průmysl	Stacionární s velkými proudy a odolností	Zdravotnická technika, průmysl, EV	UPS, EV, solární pouliční osvětlení
Shrnutí	Vysoká měrná energie, limitovaný výkon	Vysoký výkon, nižší kapacita, bezpečnější než LCO, často kombinované s NMC pro zvýšení výkonnosti	Vysoká kapacita a vysoký výkon, podíl na trhu roste, také NCM, CMN, MNC, MCN	Plochá vybíjecí křivka, vysoký výkon, nízká kapacita, velmi bezpečné, zvýšené samovybití	Nejvyšší kapacita s přiměřeným výkonem, podobné LCO	Vysoká životnost, rychlé nabíjení, široký rozsah teplot, bezpečné, nízká kapacita, vysoká cena

## 1.2.8 Porovnání běžně používaných akumulátorů

Na grafu níže jsou přehledně zobrazeny měrné energie jednotlivých druhů akumulátorů, které se nejvíce využívají a již zde byly popsány.



Obr. 1-3 Typické měrné energie jednotlivých typů akumulátorů [10]

V následující tabulce jsou vzájemně porovnány jednotlivé parametry běžně používaných typů akumulátorů.

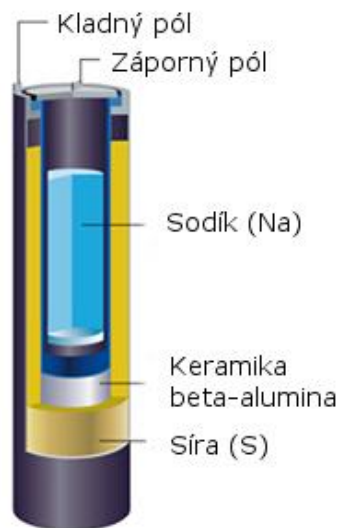
Tab. 1-9 Charakteristika běžně používaných akumulátorů (článků) [10]

Typ (chemické sl.)	Pb	NiCd	NiMH	Li-ion		
				LiCoO <sub>2</sub> (LCO)	LiMn <sub>2</sub> O <sub>4</sub> (LMO)	LiFePO <sub>4</sub> (LFP)
Jmenovité napětí [V]	2,0	1,2	1,2	3,6	3,7	3,2-3,3
Napětí při plném nabití [V]	2,4 (2,25 plovoucí)	Plné nabití detekováno napěťovou charakteristikou		4,2 (některé umožňují i vyšší)		3,6
Napětí při plném vybití [V]	1,75	1,0	1,0	2,5-3,0	2,5-3,0	2,5
Měrná energie [Wh·kg <sup>-1</sup> ]	30-50	45-80	60-120	150-250	100-150	90-120
Vnitřní odpor	Velmi nízký	Velmi nízký	Nízký	Střední	Nízký	Velmi nízký
Počet cyklů (80 % DoD)	200-300	1 000	300-500	500-1 000	500-1 000	1 000-2 000
Samovybíjení [% za měsíc] (20 °C)	5	20	30	<5 (ochranný obvod spotřebuje 3 %)		
Proudové zatížení optimální (C-rate) [-]	0,2C	1C	0,5C	<1C	<10C	<10C
Proudové zatížení špičkové (C-rate) [-]	5C	20C	5C	2C	>30C	>30C
Doba nabíjení [h]	8-16	1-2	2-4	2-4	1-2	1-2

Tolerance přebíjení	Vysoká	Střední	Nízká	Nízká		
Provozní teplota při nabíjení [°C]	-20 až 50	0 až 45		0 až 45		
Provozní teplota při vybíjení [°C]	-20 až 50	-20 až 65		-20 až 60		
Požadavky na údržbu	3-6 měsíců (dobití)	Plné vybití každých 90 dní při plném využívání		Bezúdržbové		
Bezpečnostní požadavky	Teplotně stálé	Teplotně stálé, ochrana pojistkou		Nutnost el. ochranného obvodu		
Používané od roku	2. pol. 19. stol.	1950	1990	1991	1996	1999
Toxicita	Velmi vysoká	Velmi vysoká	Nízká	Nízká		
Coulombická účinnost [%]	~90	~70 pomalé nabíjení ~90 rychlé nabíjení		99		
Cena	Nízká (\$100-200 za kWh)	Střední (\$300-600 za kWh)		Vysoká (\$300-1 000 za kWh)		

### 1.2.9 Sodík-sírové (NaS) a Sodík-chlorid nikelnaté (Na-NiCl<sub>2</sub>) akumulátory

Charakteristickým rysem NaS akumulátoru je pevný keramický elektrolyt ( $\beta$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) a kapalné elektrody. Tekutý sodík tvoří zápornou elektrodu a roztavená síra kladnou elektrodu. Vysoké vodivosti je dosaženo při teplotách v rozmezí 270-360 °C. Při pokojové teplotě jsou elektrody v pevném skupenství a tím jsou neaktivní. V tomto stavu lze akumulátor skladovat více než 50 let. Aby mohl být akumulátor využíván, musí být zahřát zdrojem tepla, čímž přejdou elektrody do kapalného skupenství. Roztavené soli mají vysokou iontovou vodivost, čímž lze dosáhnout vysokého výkonu a dlouhé životnosti. Při vybíjení prochází ionty Na<sup>+</sup> pevným elektrolytem ze záporné elektrody na kladnou elektrodu. Při nabíjení je proces opačný.



Obr. 1-4 Konstrukce NaS článku [10] (upraveno)

Druhou variantou sodíkových keramických akumulátorů je ZEBRA (Zero Emission Battery Research Activities). ZEBRA má kladnou elektrodu tvořenu halogenidem, nejčastěji chloridem nikelnatým ( $\text{NiCl}_2$ ). Sekundární kapalný elektrolyt, typicky roztavený tetrachlorohlinitan sodný ( $\text{NaAlCl}_4$ ) zvyšuje výkonnost. Materiál kladné elektrody určuje velikost napětí článku. NaS má jmenovité napětí 2 V, ZEBRA má jmenovité napětí 2,58 V.

Měrná energie se pohybuje v rozmezí  $200\text{-}250 \text{ Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$ , což je podobné energetické hustotě Li-ion akumulátorů. Počet provozních cyklů se udává 4 500 se životností 15-20 let. Tento počet cyklů je ale dosažen pouze v případě, že je akumulátor udržován na provozní teplotě, v okamžiku, kdy by docházelo k ochlazení a znovu ohřívání, počet provozních cyklů by se značně snížil. Možné proudové zatížení je poměrně malé, mezi  $0,12\text{-}0,25\text{C}$ . Akumulátory se vyrábí pro kapacity vyšší než 10 kWh. Typické aplikace akumulátorů ZEBRA jsou pro vysokozdvizné vozíky, železnice, lodě, ponorky a elektromobily. NaS akumulátory se obvykle vyrábí v 200 kWh modulech, které lze skládat. Nicméně největší využití je v elektrizační soustavě pro vyrovnávání zatížení nebo v kombinaci s obnovitelnými zdroji elektrické energie, v tzv. bateriových systémech pro skladování energie (BESS).

I při speciální izolaci, která minimalizuje tepelné ztráty, externí topení spotřebovává 14 % energie akumulátoru za den, pokud není využíván. Pokud proběhne alespoň jeden cyklus za den, díky ohmickým ztrátám je akumulátor udržován v provozním teplotním rozsahu a není nutné ohřívání vnějším zdrojem tepla. Ze zkušeností z provozu se ukazuje, že systém ohřívání způsobuje přibližně 2 % ztrát při 300 cyklech za rok. Ochlazení akumulátorů trvá 3-4 dny, ohřátí v závislosti na SoC přibližně 2 dny.

Možnou poruchou jsou elektrické zkraty zapříčiněné korozi izolace, která se poté stane vodivou, nebo růstem dendritů které zvyšují samovybíjení. Akumulátory ZEBRA jsou bezpečnější než NaS a elektrický zkrat nezpůsobí kompletní poruchu akumulátoru.

NaS akumulátory mají příznivé celkové náklady spojené s vlastnictvím v případě poskytování energie 4-8 hodin a déle při plné kapacitě. Li-ion akumulátory jsou výhodné pro vybíjení trvající 1-2 hodiny. Olověné akumulátory jsou běžně využívány pro pohotovostní provoz s malým počtem cyklů.

[10], [11]

Tab. 1-10 Výhody a nevýhody NaS a ZEBRA akumulátorů [10], [11]

Výhody	Nevýhody
Vysoká měrná energie	Malé proudové zatížení ( $0,12\text{-}0,25\text{C}$ )
Dlouhá životnost	Vysoká provozní teplota ( $300 \text{ }^\circ\text{C}$ )
Možnost rychlého nabíjení	Kovový sodík (vzplanutí při reakci s vodou)
Nezávadné pro životní prostředí	
Dostupné a levné suroviny	

### 1.2.10 Zinek-vzduch baterie

Tato baterie generuje elektrickou energii oxidací zinku pomocí kyslíku ze vzduchu. Napětí článku může být 1,65 V, ale články s nižším napětím (do 1,4 V) dosahují delší životnosti. Aktivace dodávky elektrické energie se provede odstraněním těsnícího štítu, čímž se umožní proudění vzduchu. Plného napětí články dosáhnou během 5 sekund. Průtok vzduchu může trochu regulovat reakci, po zapnutí již ale nelze baterii vrátit zpět do pohotovostního režimu. Zastavení přívodu vzduchu pouze zpomalí chemickou aktivitu a články brzy vyschnou.

Tato technologie se podobá palivovým článkům tím, že využívá kyslík ze vzduchu přiváděný na kladnou elektrodu. Považují se za primární baterie a byly zkoušeny i nabíjecí verze pro výkonové aplikace. Nabíjení se provádí výměnou vyčerpaných zinkových elektrod, které mohou být ve formě zinkové elektrolytové pasty nebo zinkových pelet.

Mají vysokou měrnou energii (300-400 Wh·kg<sup>-1</sup>), ale nízký měrný výkon. V zapouzdřeném stavu je samovybíjení nízké (2 % za rok). Jsou citlivé na vysoké a nízké teploty, na vysokou vlhkost, znečištění vzduchu ovlivňuje výkonnost a vysoký obsah CO<sub>2</sub> zvyšuje vnitřní odpor. Typickými aplikacemi jsou naslouchadla, velké systémy se používají pro napájení dálkové signalizace na železnici a bezpečnostního osvětlení na staveništích.

[10]

Tab. 1-11 Výhody a nevýhody zinek-vzduch akumulátoru [10]

Výhody	Nevýhody
Vysoká měrná energie (300-400 Wh·kg <sup>-1</sup> )	Nízký měrný výkon
Nízké samovybíjení (2 % za rok v zapouzdřeném stavu)	Citlivost na vysoké a nízké teploty a na vysokou vlhkost
Nízké výrobní náklady	Znečištění vzduchu ovlivňuje výkonnost, vysoký obsah CO <sub>2</sub> zvyšuje vnitřní odpor
	Primární článek, nabití lze zajistit výměnou použitých zinkových elektrod

### 1.2.11 Stříbro-zinkové akumulátory (AgZn)

Napětí článku naprázdno je 1,6 V. Kvůli vysoké ceně stříbra se používají velmi malé akumulátory, kde množství stříbra nepřispívá výrazně k celkovým nákladům, nebo ve větších velikostech pouze pro kritické aplikace, kde vyšší výkonnost převáží nad náklady. Větší akumulátory se používají v ponorkách, raketách, leteckém a kosmickém průmyslu. Tyto akumulátory se také používají v televizních kamerách, u kterých je vyžadována delší doba provozu. Vysoká cena a krátká životnost neumožňovaly komerční využívání, ale díky vývoji jsou na pokraji znovuzrození.

Původní příčinou selhání akumulátoru tohoto typu byl rozpad zinkové elektrody a separátoru. Cyklování vyvíjelo zinkové dendrity, které pronikaly skrz separátor a zapříčinily zkrat. Navíc separátor degradoval umístěním v elektrolytu hydroxidu draselného. Tímto byla životnost omezena na přibližně 2 roky. Vylepšení elektrod a separátoru ale slibují delší životnost a o 40 % vyšší měrnou energii než Li-ion akumulátory.

[10]

Tab. 1-12 Výhody a nevýhody AgZn akumulátoru [10]

Výhody	Nevýhody
Vyšší měrná energie (o 40 % než Li-ion)	Vysoké výrobní náklady
Bezpečnost	Krátká životnost
Bez toxických kovů	
Recyklovatelnost	

## 1.2.12 Porovnání alternativních akumulátorů

V této tabulce jsou přehledově porovnány parametry dostupných alternativních akumulátorů, které byly popsány v předchozí části.

Tab. 1-13 Shrnutí nejběžnějších alternativních akumulátorů a ekvivalentů [10]

Typ (chemické sl.)	NaS; Na-NiCl <sub>2</sub> (ZEBRA)	Zn-vzduch	AgZn; Ag-oxid
Charakteristika	Roztavená sůl (Na) a síra (S), ekonomičtější pro větší velikosti	Hlavně primární články, sdílí podobnost s palivovým článkem	AgZn je dobíjecí, Ag-oxid je primární článek
Napětí článku [V]	2,58	1,4-1,65	1,6
Měrná energie [Wh·kg <sup>-1</sup> ]	90-120	300-400	250
Aktivace	Pracují při 270-350 °C	Odstranění těsnění umožní proudění vzduchu	Okamžitá
Nabíjení	Nabíjení přes noc	Nabíjení výměnou zinkových elektrod	Podobné Li-ion
Vybíjení	Dávka vysokého výkonu	Nízké zatížení	Podobné Li-ion
Životnost	3 000 cyklů; 8 let	Jednou aktivovaná, baterie se vybíjí	Nízký počet cyklů; 2 roky
Údržba	Udržování teplého akumulátoru	Pouze aktivace	Bezúdržbové
Režimy selhání	Elektrické zkraty zapříčiněné korozí	Citlivé na nízké a vysoké teploty, vlhkost a znečištění ovzduší	Rozpad zinkové elektrody a separátoru; cyklování způsobuje tvorbu dendritů
Provedení	Rozsáhlé systémy 10 kWh a více	Většinou malé velikosti	Knoflíkové (AgZn)
Historie	Vymyšleno Němci ve 2. sv. válce; NaS získal nový zájem v 70. letech 20. stol	„Dýchání“ objevil Lencanché r. 1878, nabídnuto kupujícím r. 1932	Kosmické použití kvůli vysoké kapacitě (nyní nahrazovány Li-ion)
Aplikace	Primární: jednorázové rakety; Sekundární: UPS, vyrovnávání zatížení, EV (Think City), dodávky	Naslouchadla; velké jednotky pro železniční signalizaci, bezpečnostní osvětlení dolů	Primární: hodinky, zálohování pamětí; Sekundární: letecký a kosmický průmysl, rakety, armáda, TV kamery
Komentář	Ohřívání spotřebuje 14 % energie akumulátoru denně	Vysoká kapacita, nízká cena, ale jednorázové použití	Nové konstrukce ukazují přesah kapacity Li-ion; drahé suroviny

## 1.2.13 Průtokové akumulátory

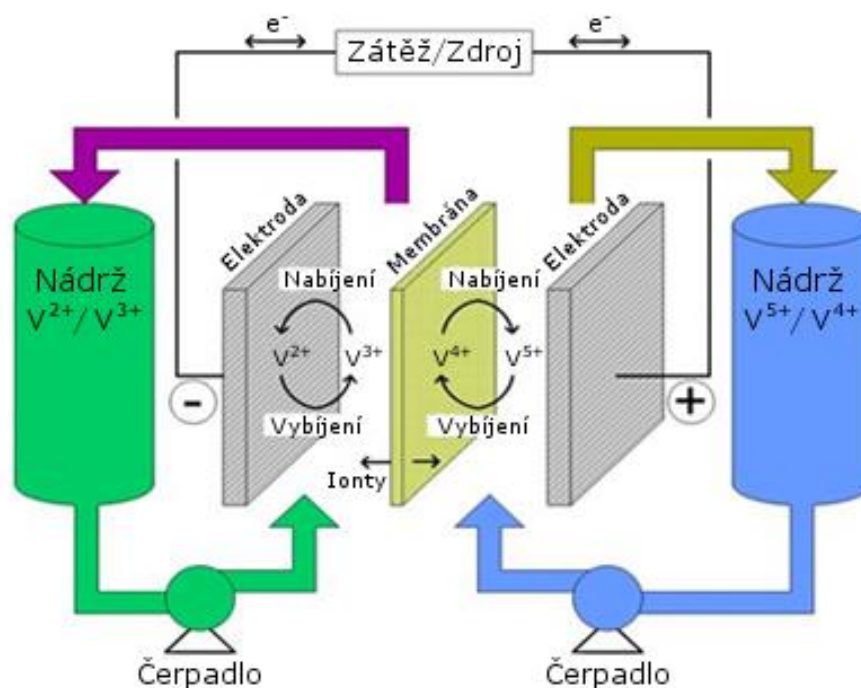
Jedná se o přechod mezi konvenčním elektrochemickým akumulátorem a palivovým článkem. Kapalný elektrolyt kovových solí, nejčastěji tvořený kyselinou sírovou se solí vanadu, je čerpán přes jádro složené z kladné a záporné elektrody, které jsou odděleny membránou. Elektrody jsou ve formě bipolárních grafitových desek. Výměna iontů mezi kladnou elektrodou a zápornou elektrodou generuje elektrinu.

Průtokové akumulátory nejlépe fungují při velikosti nad 20 kWh. Umožňují více jak 10 000 plných cyklů a provoz okolo 20 let. Jeden článek má napětí 1,15-1,55 V. Vyššího napětí lze opět dosáhnout sériovým spojením článků (se společnými nádržemi). Měrná energie je přibližně 40 Wh·kg<sup>-1</sup>. Rychlost náběhu a velikost výkonu jsou průměrné. Z těchto důvodů jsou tyto akumulátory vhodnější pro velká

energetická uložení v elektrizační soustavě, nejsou vhodné pro rychlé vyrovnávání výkonové nerovnováhy v síti a pro elektrické pohony vozů.

Elektrolyt je uložen v nádržích, zdvojením jejich velikosti lze dosáhnout zvýšení energetické hustoty akumulátoru. Kapacita akumulátoru je dána objemem elektrolytu. Problémem tohoto systému je koroze membrán a jejich vysoká cena.

[10]



Obr. 1-5 Uspořádání průtokového akumulátoru [10] (upraveno)

Tab. 1-14 Výhody a nevýhody průtokového akumulátoru [10]

Výhody	Nevýhody
Vysoká životnost	Potřeba čerpadel
Znovuvyužití elektrolytu při výměně jádra akumulátoru	Nízká měrná energie
	Průměrná velikost a rychlost nárůstu výkonu
	Koroze membrán a jejich vysoká cena

## 1.2.14 Nadějně budoucí akumulátory

### Lithium-vzduch

Tento typ akumulátoru slibuje uložení mnohem více energie, než současné Li-ion akumulátory. Inspirací pro vytvoření akumulátoru, který by „dýchal“ vzduch, jsou technologie zinek-vzduch a palivový článek. Akumulátor využívá katalytickou vzduchovou kladnou elektrodu, která dodává kyslík, elektrolyt a lithiovou zápornou elektrodu. Teoretická měrná energie je až  $13\,000\text{ Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Také se testuje akumulátor na bázi hliník-vzduch a jeho měrná energie je o trochu nižší, konkrétně rovna  $8\,000\text{ Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$ .



Pokud by mohly být zmíněné energie skutečně dodány, byly by tyto kov-vzduchové akumulátory vhodné pro elektrická vozidla a energeticky přibližně srovnatelné s benzínem. Ale i čtvrtinová měrná energie by v konečném výsledku předčila, díky vysoké účinnosti elektromotoru (vyšší než 90 %), spalovací motor s nízkou tepelnou účinností (25-30 %). V závislosti na použitých materiálech Li-vzduchové články produkují napětí mezi 1,7-3,2 V.

Podobně jako u ostatních akumulátorů využívajících vzduch je měrný výkon nízký, zvláště při nízkých teplotách. Čistota vzduchu, hlavně ve městech, není dostatečná a Li-vzduchové akumulátory by musely mít navíc filtry. Nakonec by tyto akumulátory mohly skončit s kompresory, čerpadly a filtry, podobně jako palivové články, spotřebovávající 30 % vyrobené energie pro udržení přídavné technologie v chodu. Dalším problémem je syndrom náhlé smrti akumulátoru. Lithium a kyslík vytváří vrstvu peroxidu lithia, která tvoří bariéru a zabraňuje pohybu elektronů a má za následek prudké snížení dosažitelné kapacity akumulátoru. Vědci testují příměsi, které by tomuto zabránily. Počet provozních cyklů také potřebuje vylepšení, v současnosti bylo v laboratořích docíleno pouze přibližně 50 cyklů.

[10]

### Lithium-kov

Jsou již dlouhou dobu považovány za budoucí akumulátory, kvůli vysoké měrné energii a dobrým zatěžovacím možnostem. Můžou dosahovat 2 500 provozních cyklů, krátkého času nabíjení a konkurenceschopné ceny při hromadné výrobě. Nicméně nekontrolovatelná depozice lithia způsobuje růst dendritů, které pronikají do separátoru a vytvářejí elektrický zkrat. I když lithium-kovové akumulátory prošly přísnými schvalovacími procesy, dlouhodobá bezpečnost zůstává problémem. Řešení pro omezení dendritů může být blízké. Provádí se testy přidání nanodiamantů jako aditiva do elektrolytu. Lithium upřednostňuje absorpci na povrchu diamantu, což vede k rovnoměrnému ukládání a zlepšení cyklové výkonnosti. Li-kovové akumulátory mohou vyžadovat další opatření včetně nehořlavých elektrolytů, bezpečnějších materiálů elektrod a silnějších separátorů.

[10]

### Lithiové s pevným elektrolytem (Solid-state Lithium)

Současné Li-ion akumulátory používají grafitovou zápornou elektrodu, což snižuje měrnou energii. Lithiové akumulátory s pevným elektrolytem nahrazují grafit čistým lithiem a kapalný elektrolyt nasáklý v porézním separátoru pevným polymerem nebo keramickým separátorem. Tímto se podobají lithium-polymerovým akumulátorům, které se neprosadily kvůli bezpečnosti a z výkonnostních důvodů. Některé podobnosti sdílí s lithium-kovovými akumulátory a vědci zkouší překonat problém tvorby kovových vláken použitím suchého polymeru a keramických separátorů. Dalšími výzvami jsou dosažení dostatečné vodivosti při nízkých teplotách a zvýšení počtu provozních cyklů (dosahují 100 cyklů).

Pevné lithiové akumulátory by měly dosahovat dvojnásobné měrné energie v porovnání s klasickými Li-ion, ale zatížitelnost bude asi nižší. Cílovými aplikacemi jsou vyrovnávání mezi spotřebou a výrobou energie obnovitelnými zdroji a také v elektromobilech díky krátkým nabíjecím časům, které tyto akumulátory nabízejí. Nevýhodami jsou vyšší vnitřní impedance, mají slabou výkonnost při nízkých teplotách a podléhají růstu dendritů.

[10]

### Lithium-síra (Li-S)

Díky přednosti nízké atomové hmotnosti lithia a střední hmotnosti síry, lithium-sírové akumulátory dosahují vyšší měrné energie okolo  $550 \text{ Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$ , což je přibližně třikrát více než Li-ion, ale jejich teoretický potenciál je ještě mnohem vyšší. Zároveň dosahují úctyhodného měrného výkonu  $2\,500 \text{ W}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Během vybíjení se lithium uvolňuje z povrchu záporné elektrody a při nabíjení se na ni vrací zpět. Napětí článku je 2,1 V, poskytují dobré vybíjecí charakteristiky za nízkých teplot a mohou být nabíjeny i při  $-60 \text{ }^\circ\text{C}$ . Akumulátory jsou šetrné k životnímu prostředí, síra je hojně dostupná. Cena může být přibližně \$250 za kWh. V Li-S akumulátorech je grafitová záporná elektroda nahrazena kovovým lithiem, katalyzátor zajišťuje dvojitou službu jako elektroda a poskytovatel iontů lithia. Kladná elektroda, která je v Li-ion akumulátorech tvořena oxidy kovů, je nahrazena lehčí a levnější sírou, čímž se sníží celková hmotnost. Síra má také přidanou výhodu ve formě zvýšené schopnosti přijímat lithiové atomy.

Výzvou nutnou pro rozšířené využívání je prodloužení životnosti. V současné době je počet provozních cyklů omezen na 40-50, protože síra během cyklování ubývá z kladné elektrody a reaguje s lithiem na záporné elektrodě. Dalším problémem je nízká vodivost, degradace kladné elektrody v čase a špatná stabilita při vyšších teplotách. Pro zlepšení vlastností vědci experimentují se slibnými výsledky s nanostrukturami a také s grafenem.

[10]

### Sodík-ion (Na-ion)

Tento typ akumulátoru představuje možnou levnější alternativu k Li-ion akumulátorům, protože sodík je levný a lehce dostupný. Na-ion může být úplně vybit, aniž by došlo k namáhání, které je běžné u jiných typů akumulátorů. Některé články mají napětí 3,6 V, měrná energie je okolo  $90 \text{ Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$  a cena za kWh je srovnatelná s olověnými akumulátory. V rámci výzkumu je třeba se zaměřit na zvýšení počtu nabíjecích a vybíjecích cyklů a vyřešit problém objemového rozšíření plně nabitého akumulátoru.

[10]

### Lithium-mangan-železo-fosfát (LMFP)

Tato technologie umožňuje navýšení kapacity o 15 % oproti obvyklým Li-fosfátovým ( $\text{LiFePO}_4$ ) systémům. Průměrné pracovní napětí článku je 4 V, měrná energie  $135 \text{ Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$  a životnost 5 000 cyklů. Ekonomické náklady a bezpečnost jsou dalšími benefity, které zvýhodňují použití těchto akumulátorů pro vozy na elektrický pohon.

[10]

## 1.2.15 Porovnání nadějných budoucích akumulátorů

Následující tabulka vzájemně porovnává možné budoucí akumulátory.

Tab. 1-15 Shrnutí nadějných budoucích akumulátorů [10]

Typ (chemické sl.)	Lithium-vzduch	Lithium-kov	Lithiové s pevným elektrolytem	Lithium-síra (Li-S)	Sodík-ion (Na-ion)
Typ	Kladná elektroda vzduch, záporná elektroda lithium	Záporná elektroda lithium, kladná elektroda grafit	Záporná elektroda lithium, separátor polymer	Záporná elektroda lithium, kladná elektroda síra	Záporná elektroda uhlík, různé kladné elektrody
Napětí článku [V]	1,7-3,2	3,6	3,6	2,1	3,6
Měrná energie [Wh·kg <sup>-1</sup> ]	13 000 (teoretická)	300	300 (odhad)	500	90
Nabíjení	Neznámé	Rychlé	Rychlé	0,2C (5 h)	Neznámé
Vybíjení	Nízký výkon, horší při nízkých teplotách	Široký výkonový rozsah	Nízká vodivost při nízkých teplotách	Vysoký výkon (2,5 kW·kg <sup>-1</sup> )	Neznámé
Počet cyklů	50 (laboratorní)	2 500	100 (prototypy)	50 (zpochybováno)	50 (typický)
Režimy selhání	Používáním vrstva peroxidu lithia zastavuje pohyb elektronů. Znečištění vzduchu způsobuje poškození.	Používáním rostou dendrity způsobující elektrický zkrat	Růst dendritů způsobuje elektrický zkrat; slabá výkonnost při nízkých teplotách	Síra cyklováním degraduje; nestabilní při vysokých teplotách, nízká vodivost	Malý výzkum v této oblasti
Bezpečnost	Neznámá	Potřebuje vylepšení	Potřebuje vylepšení	Vyžadován ochranný obvod	Bezpečné, možná letecká přeprava
Historie	Zahájeno v 70. letech 20. stol.; obnovený zájem po roce 2000. Výzkum a vývoj IBM, MIT a další.	Produkovala v 80. letech 20. stol. Moli Energy, bezpečnostní stažení z oběhu	Podobné Li-polymer, začátek r. 1970	Nová technologie; Výzkum a vývoj Oxis Energy, Bosch a další.	V 80. letech 20. stol. zastíněno upřednostňováním lithia; obnovený zájem
Aplikace	Není definováno; potenciál pro EV	EV, průmyslové a přenosné použití	Energetické akumulární systémy, EV	Použito v solárně poháněném letadle v roce 2008	Energetické akumulární systémy
Komentář	Inspirace konceptem zinek-vzduch a palivových článků	Dobrá kapacita, rychlé nabíjení a vysoký výkon udržují vysoký zájem	Podobné Lithium-kov; můžou být připraveny po r. 2020; po r. 2025 v EV	Můžou být nástupcem Li-ion díky nižší ceně a vyšší kapacitě	Nízká cena srovnatelná s Pb akumulátory. Můžou být plně vybíjeny.

## 1.3 Chemický systém akumulace

### 1.3.1 Palivový článek

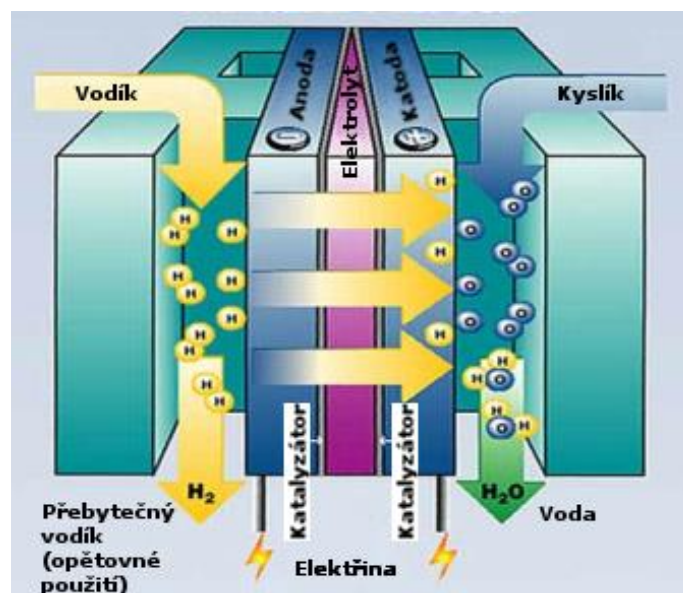
V palivovém článku probíhají také elektrochemické reakce. Pro produkci elektrické energie je využíván vodík a kyslík. Kromě již zmíněné elektřiny, vzniká také tepelná energie a čistá voda. Vodík je uložen ve stlačeném stavu v tlakové nádobě a kyslík je odebírán ze vzduchu. Palivový článek je složen z kladné elektrody a záporné elektrody, které jsou odděleny elektrolytem nebo membránou. Na zápornou elektrodu je přiváděn vodík a na kladnou elektrodu kyslík. Katalyzátor na záporné elektrodě rozděluje vodík na kladně nabitě ionty vodíku a elektrony. Kyslík je ionizován a prochází přes elektrolyt na stranu záporné elektrody, kde se sloučí s vodíkem. Jeden článek generuje napětí 0,6-0,8 V pod zatížením (1 V naprázdno).

Vodík je třetí nejhojnější prvek na zemském povrchu, tvoří až 90 % vesmíru. Nicméně je vázán na jiné látky a k jeho uvolnění je zapotřebí značné množství energie. Vodík může být téměř energeticky neutrální, to znamená, že na jeho produkci je potřeba stejné množství energie, které může v konečné fázi dodat. Sám o sobě není vodík zdrojem energie, ale prostředkem k přepravě a ukládání energie. Velkou nevýhodou vodíku je jeho skladování. Pro skladování stlačeného vodíku je zapotřebí těžkých odolných ocelových nádrží, v případě tekutého vodíku je zase nutná pro skladování v chladu rozsáhlá izolace.

Vodík lze produkovat pomocí reformátoru extrakcí z paliv (methanol, propan, butan, zemní plyn), čímž je také uvolňován zbytkový uhlík, nicméně tato metoda je méně škodlivá k životnímu prostředí než přímé spalování těchto paliv. Druhou metodou výroby vodíku, kterou lze spíše použít pro akumulaci elektrické energie, je elektrolýza vody. Tato metoda ale spotřebovává velké množství elektrické energie, a účinnost celého procesu je poměrně nízká.

Účinnost vlastního palivového článku se pohybuje okolo 50 %. Vysoký vnitřní odpor článku způsobuje pokles napětí se zatížením. Palivové články fungují nejlépe při 30% faktoru zatížení, při vyšším zatížení klesá jejich účinnost. Z tohoto důvodu jsou využívány převážně jako podpurné zařízení nebo jako nabíjecí zdroje pro akumulátory.

[10]



Obr. 1-6 Princip palivového článku [10] (upraveno)

Tab. 1-16 Výhody a nevýhody palivových článků [10]

Výhody	Nevýhody
Vysoká měrná energie vodíku	Nízká energetická účinnost
Dlouhá doba provozu	Pomalá reakce na změnu zátěže
	Nízký výkon
	Pokles napětí se zatížením (vysoký vnitřní odpor)
	Potřeba kompresoru (pro vyšší výkon)
	Vysoká cena

## 1.4 Elektrický systém akumulace

### 1.4.1 Superkapacitory

Na rozdíl od klasického kondenzátoru se superkapacitory vyznačují vyšší kapacitou uchovávané energie. Energie je uchovávána ve formě elektrostatického náboje. Nabíjí se přiložením rozdílového napětí na kladnou a zápornou elektrodu.

Existují tři typy kondenzátorů. Nejzákladnějším typem jsou elektrostatické kondenzátory se suchým dielektrikem. Vyznačují se velmi nízkou kapacitou, v řádech pikofarad (pF) až jednotek mikrofaraad ( $\mu\text{F}$ ). Druhou skupinu tvoří elektrolytické kondenzátory, které poskytují vyšší kapacitu, v řádu mikrofaraad ( $\mu\text{F}$ ). Tyto kondenzátory obsahují vlhký separátor. Podobně jako u akumulátorů mají elektrolytické kondenzátory kladnou a zápornou polaritu elektrod, kterou je nutné dodržovat. Třetím typem jsou superkapacitory. Jejich kapacita je v řádu farad (F) a výše. Superkapacitory se používají k ukládání elektrické energie, kdy dochází k častým cyklům nabíjení a vybíjení vysokým proudem a krátké době trvání.

Superkapacitory využívají speciální elektrody a elektrolyt. Základní elektrochemický dvouvrstvý kondenzátor (EDLC) využívá elektrostatické působení, asymetrický elektrochemický dvouvrstvý kondenzátor (AEDLC) používá elektrody podobné jako v akumulátorech, aby bylo dosaženo vyšší měrné energie, ale zároveň dochází ke snížení životnosti a dalším negativům společným s akumulátory. V současné době je nejvíce využívaný systém založený na elektrochemickém dvouvrstvém kondenzátoru využívajícím uhlíkové porézní elektrody s velkým povrchem a organický elektrolyt. Dalším vývojovým stádiem je využívání grafenových elektrod. Při nabíjení se vytváří na přechodu každé z elektrod s elektrolytem tenká polarizovaná elektrická dvojvrstva, která uchovává náboj.

Maximální napětí superkapacitoru je omezeno na 2,5-2,7 V. Mírně vyšší napětí je povoleno, ale dochází k omezování životnosti. Pro získání vyššího napětí se jednotlivé superkapacitory spojují do série podobně jako akumulátorové články. Sériové spojení snižuje celkovou kapacitu a zvyšuje vnitřní impedanci. Řetězec s více jak třemi superkapacitory potřebuje systém napěťového vyrovnávání pro zabránění přepětí na jednotlivých kondenzátorech, podobně jako je tomu nutno u Li-ion akumulátorů.

Měrná energie se pohybuje mezi  $1\text{-}30 \text{ Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$  (10-50krát méně než Li-ion). Nevýhodou superkapacitorů je vybíjecí křivka, kdy napětí klesá lineárně, tím se snižuje i dodávaný výkon (lze udržet konstantní zvyšováním proudu) a pro požadovanou minimální mez napětí lze ze superkapacitoru získat méně elektrické energie než z akumulátorů, kde napětí klesá jen mírně a k prudšímu poklesu dochází až v závěru vybíjení. Nabíjecí čas je přibližně 1-20 s. Počáteční nabití trvá velmi krátce, dobíjení do plné

kapacity poté trvá déle. Nabíjecí proud je do značné míry omezen schopností nabíječky. Superkapacitor nepodléhá přebíjení a nepotřebuje detekci plného nabití, proud v tomto okamžiku klesne k nule.

Tab. 1-17 Porovnání superkapacitoru s Li-ion akumulátorem [10]

	Superkapacitor	Li-ion (obecně)
Jmenovité napětí [V]	2,3-2,75	3,6
Měrná energie [Wh·kg <sup>-1</sup> ]	5 (typicky)	120-240
Měrný výkon [W·kg <sup>-1</sup> ]	až 10 000	1 000-3 000
Doba nabíjení [s]	1-10	600-3 600
Samovybíjení [% za měsíc]	50	5
Počet provozních cyklů	1 milion (30 000 h)	500 a více
Životnost (průmyslová) [rok]	10-15	5-10
Provozní teplota při nabíjení [°C]	-40 až 65	0 až 45
Provozní teplota při vybíjení [°C]	-40 až 65	-20 až 60
Cena za kWh [€]	10 000	250-1 000

Superkapacitor může být nabíjen a vybíjen téměř neomezeně krát, cyklováním dochází pouze k mírnému opotřebení. Životnost superkapacitoru je vyšší než Li-ion akumulátorů. Při běžných provozních podmínkách klesne dosažitelná kapacita z původních 100 % na 80 % za 10 let. Aplikace vyššího napětí snižuje životnost. Výhodou je možnost využívání při vysokých i nízkých teplotách. Samovybíjení superkapacitoru (50 % za 30-40 dní) je podstatně vyšší než u Li-ion akumulátorů (5 % za měsíc). U elektrochemických akumulátorů určuje velikost napětí chemické složení akumulátoru, v případě superkapacitoru je maximální napětí určeno dielektrickým materiálem mezi elektrodami. Pro zvýšení kapacity se v určitých typech kondenzátorů používá elektrolyt.

Superkapacity nelze použít jako náhradu za akumulátory pro dlouhodobou akumulaci elektrické energie. Jejich použití je výhodné v případech, kdy nabíjecí a vybíjecí časy jsou kratší než 60 s, např. pro vykrytí mezer při výpadku napájecího napětí trvajících několik sekund až jednotek minut nebo pro omezení krátkodobého zvýšení odběru výkonu. Kombinací superkapacitoru a akumulátoru dochází ke snižování namáhání akumulátoru a tím prodloužení jeho životnosti. Tento hybridní systém je využíván při rekuperačním brzdění a následném zrychlování v některých elektromobilech.

[10]

Tab. 1-18 Výhody a nevýhody superkapacitoru [10]

Výhody	Nevýhody
Téměř neomezená cyklová životnost	Nízká měrná energie
Vysoký měrný výkon (nízký odpor umožňuje vysoké zátěžné proudy)	Lineární pokles napětí při vybíjení omezuje využití plného energetického rozsahu
Nabíjení v řádu sekund	Vysoké samovybíjení
Bez potřeby detekce plného nabití	Nízké napětí článku
Snadné nabíjení, nepodléhá přebíjení	Nutný systém balancování napětí jednotlivých kondenzátorů zapojených do série
Vynikající výkonnost při nízkých teplotách	Vysoká cena za výkon

## 1.4.2 Porovnání systémů odlišných od běžných akumulátorů

V této tabulce jsou porovnány parametry superkapacitoru, průtokového akumulátoru a palivového článku.

Tab. 1-19 Shrnutí akumulčních systémů odlišných od elektrochemického konceptu [10]

Typ (chemické sl.)	Superkapacitor	Průtokový akumulátor	Palivový článek
Charakteristika	Dvouvrstvý kondenzátor. Ukládá energii formou statického náboje na rozdíl od elektrochemické reakce	Dobíjitelné; řízené čerpadly, elektrolyt uložen v nádržích	Slučování vodíku a kyslíku produkuje elektrinu
Napětí článku [V]	Omezeno na 2,3-2,75	1,15-1,55	0,6-0,8
Měrná energie [Wh·kg <sup>-1</sup> ]	5 (typicky)	40	40
Aktivace	Okamžitá	Pomalý náběh	Pomalý náběh
Nabíjení	1-10 s; jednoduché, proud klesne k nule, když je nabit	Nabíjení přes noc	Vodík se doplňuje přes nádrž
Vybíjení	Velmi vysoký výkon	Nízký zátěžný proud	Nízký zátěžný proud
Životnost	1 milion cyklů; 10-15 let	10 000 cyklů; 20 let	2 000-4 000 h; stacionární až 40 000 h
Údržba	Nízká	Vysoká	Vysoká
Režimy selhání	Překročení napěťových limitů snižuje životnost	Vysoká koroze. Vanad udržuje korozi pod kontrolou	Poškození zásobníku mrazem a teplem; cyklováním klesá kapacita
Provedení	Většinou ve válcových formátech	Velké systémy, 20 kWh a více	Velké systémy, nebo také přenosné
Prostředí	Široký teplotní rozsah. Netoxické	Funguje spíše jako rafinerie než akumulátor	Musí mít správný obsah vlhkosti. Nemůže zamrznout
Aplikace	Zálohování pamětí, rozběh generátoru, velké MW systémy. Soupeří se setrvačníky	Rozsáhlé systémy akumulace energie; ekonomičtější pro větší velikosti	Vysokozdvíhový vozík, EV, UPS, přenosné použití v armádě
Komentář	Vysoká cena za Wh	Kapacita dána velikostí nádrží, v případě potřeby lze zvětšit	Čisté, ale drahé; slabé výkonové pásmo

## 1.5 Magnetický systém akumulace

### 1.5.1 Supravodivé cívky

Supravodivé magnetické systémy akumulace (SMES – Superconducting Magnetic Energy Storage), ukládají elektrickou energii přímo ve formě elektrického proudu, který může supravodivou cívku cyklovat beze ztrát energie. Supravodivost, která se vyznačuje úplným zmizením rezistance a vyloučením magnetického pole v různých pevných látkách, nastane v okamžiku, kdy jsou ochlazeny pod charakteristickou kritickou teplotu. Vytlačení magnetického pole (diamagnetismus) ze supravodiče během přechodu do supravodivého stavu se nazývá Meissnerův efekt. Kritická teplota se pro jednotlivé materiály liší. Supravodiči I. typu jsou hlavně kovy nebo polokovy. Jejich charakteristikou je nulová rezistivita pod kritickou teplotou (blízká absolutní nule), nulové vnitřní magnetické pole a kritické magnetické pole nad kterým supravodivost skončí. Patří sem např. hliník, cín, olovo, rtuť, uran, zinek, kadmium, titan, galium, indium a další. Supravodiče II. typu jsou vyrobeny ze slitin nebo smíšené oxidové keramiky. Tyto supravodiče jsou tzv. vysokoteplotní. Jsou mechanicky tvrdší a projevuje se

u nich vyšší kritické magnetické pole, při kterém ztrácejí supravodivost. Obvykle existují ve stavu s normálními a supravodivými oblastmi, kdy vykazují nekompletní Meissnerův efekt. Prakticky se používají převážně vysokoteplotní supravodiče.

Tyto systémy ukládají energii v magnetickém poli vytvořeném tokem stejnosměrného proudu v supravodivé cívce, která je kryogenně chlazená na teplotu nižší, než je kritická teplota supravodivosti. Pro udržení supravodivého stavu je cívka ponořena do kapalného helia umístěného v kryostatu, který je vakuově izolován. Obvykle je vodič vyroben ze slitiny niobu a titanu (NbTi) a chladícím médiem je kapalné helium o teplotě 4,2 K, nebo supratekuté helium o teplotě 1,8 K (s nulovou viskozitou). SMES se skládají ze tří hlavních komponent. Supravodivé jednotky (cívky), kryostatického systému a systému výkonového měniče. Jakmile je supravodivá cívka nabitá, proud se v cívce nesnižuje a magnetická energie může být uložena po neomezeně dlouhou dobu. Výkonové spínače v usměrňovačích převádějí střídavý proud (AC) na stejnosměrný (DC) a naopak ve střídačích převádí stejnosměrný proud zpět na střídavý. Měnič vytváří přibližně 23 % energetických ztrát v každém nabíjecím a vybíjecím cyklu. Velikost energie uložené v supravodivé cívce lze určit následovně:

$$E = \int_0^t i \cdot L \cdot \frac{di}{dt} \cdot dt = L \cdot \int_0^I i \cdot di = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2 \quad (1.5-1)$$

kde:  $E$  ... energie uložená v magnetickém poli cívky [J]  
 $t$  ... čas [s]  
 $L$  ... indukčnost cívky [H]  
 $i, I$  ... proud procházející cívkou [A]

Pro vysokoteplotní supravodiče se používá jako chladivo spíše kapalný dusík, který je levnější a snáze se s ním pracuje než s tekutým heliem. První SMES byl zkonstruován v 70. letech 20. stol. Vhodné použití je v oblasti udržování napěťové stability a výkonové kvality pro velké průmyslové odběratele nebo v elektrizační soustavě. SMES mají téměř neomezenou cyklovou životnost, rychlou odezvu vybíjení, umožňují dodávat velký výkon, ale pouze krátkou dobu, pokud jsou drženy v supravodivém stavu, nedochází téměř ke ztrátám a lze akumulovat energii i dlouhodobě. Na druhou stranu, mají velmi nízkou měrnou energii, je nutný energeticky nákladný kryogenní systém na udržování nízké teploty, struktura zařízení musí být mechanicky robustní a investiční náklady jsou vysoké.

[14]

Tab. 1-20 Výhody a nevýhody supravodivého magnetického systému akumulace [14]

Výhody	Nevýhody
Téměř neomezená cyklová životnost	Velmi nízká měrná energie (0,5-5 Wh·kg <sup>-1</sup> )
Vysoký měrný výkon (500-2 000 W·kg <sup>-1</sup> )	Nutný kryogenní systém pro udržení nízkých teplot
Velmi rychlá odezva	Vysoké energetické náklady na udržení nízkých teplot
Vysoká spolehlivost	Samovybíjení závislé na dosažené nízké teplotě (0 % při 4 K, 100 % při 140 K)
Menší závislost na velikosti vybíjecího proudu než u elektrochemických akumulátorů	Mechanicky robustní struktura (velké Lorenzovy síly)
Hluboké vybití nemá žádný negativní vliv	Krátký čas vybíjení
Umožňuje krátkodobou i dlouhodobou akumulaci energie	Vysoká cena (\$1 000-10 000 za kWh)
Vysoká energetická účinnost (95 % nabití/vybití)	



## 1.6 Mechanický systém akumulace

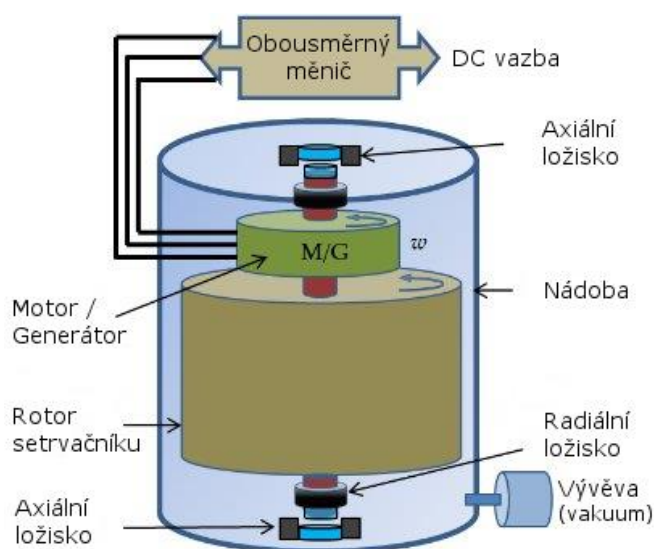
### 1.6.1 Setrvačníky

Setrvačnick, jako prostředek pro uchování energie existuje již tisíce let. Jedná se o jeden z nejčasnějších mechanických systémů akumulace energie. Elektrická energie je přeměněna na energii kinetickou, která je uložena v rotující hmotě setrvačnicku. Setrvačnick se urychluje při ukládání elektrické energie a zpomaluje při odebírání el. energie. Rotující setrvačnick je urychlován elektrickým strojem v motorickém režimu. V případě zpětného odběru elektrické energie ze setrvačnicku, je naopak mechanická energie přeměňována zpětně na energii elektrickou pomocí stejného stroje, který ale pracuje v generátorickém režimu. Množství uložené energie je závislé na tvaru a materiálu rotoru setrvačnicku. Je přímo úměrné momentu setrvačnickosti a kvadrátu úhlové rychlosti, dle následující rovnice:

$$E = \frac{\omega^2}{2} \int_0^M r^2 \cdot dm = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega^2 \quad (1.6-1)$$

kde:  $E$  ... uložená kinetická energie [J]  
 $\omega$  ... úhlová rychlost [ $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ ]  
 $m, M$  ... hmotnost tělesa [kg]  
 $r$  ... vzdálenost od osy rotace [m]  
 $J$  ... moment setrvačnickosti [ $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ]

Nízkootáčkové setrvačnick (typicky do 10 000 otáček za minutu), jsou obvykle vyrobeny z těžšího kovového materiálu a využívají mechanická nebo magnetická ložiska. Vysokootáčkové setrvačnick (až 100 000 otáček za minutu) většinou využívají lehčí, ale pevnější kompozitní materiály, a obvykle vyžadují magnetická ložiska (aktivní nebo pasivní). Vysokootáčkové setrvačnick mohou být až pětikrát dražší než nízkootáčkové. Celý systém je uložen v nádobě ze dvou účelů. Prvním účelem je vytvoření prostředí s nízkým odporem plynu (vakuum) a druhým je ochrana pro případ poruchy. Obvykle je nádoba vyrobena z tlusté oceli nebo jiného vysoce pevného materiálu, jako jsou kompozity. Pro provoz je zapotřebí vývěva, která udržuje uvnitř nádoby snížený tlak v případě netěsnosti, a efektivní chladicí systém, pro odvádění tepla generovaného el. strojem a dalšími částmi setrvačnickového systému.



Obr. 1-7 Struktura a komponenty setrvačnicku [13] (upraveno)

Nejvíce jsou setrvačnickové akumulční systémy využívány jako zdroje nepřerušovaného napájení (UPS) v případě výpadku elektrické dodávky. Díky jejich okamžité odezvě, dokážou udržet konstantní napětí do okamžiku, než naskočí jiné záložní zdroje (dieselgenerátory), které nabíhají pomalu. Popřípadě můžou být využity k udržování kvality elektrické energie (regulace napětí a frekvence), kdy by mohl krátkodobý pokles napětí v síti vyřadit z provozu některé technologie. Menší setrvačnickové systémy jsou např. používané v hybridních a elektrických vozích. Jejich velkou výhodou je dlouhá životnost s téměř neomezeným počtem provozních cyklů (vyšší než u superkapacitoru), rychlá odezva na požadavek dodávky výkonu, poměrně vysoká účinnost cyklu (90-95 %), poskytují vysoký měrný výkon, mají poměrně vysokou měrnou energii ( $120 \text{ Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), použité materiály nejsou závadné pro životní prostředí a požadavky na provoz a údržbu jsou nízké. SoC lze snadno určit dle rotační rychlosti, navíc není ovlivněn stárnutím a teplotou. Na druhé straně setrvačnickové systémy mají velmi vysoké samovybití, rotor může být nebezpečný v případě nesprávného návrhu a mají vysoké investiční náklady (srovnatelné se superkapacitory).

[13]

Tab. 1-21 Výhody a nevýhody setrvačnickového systému akumulace [12], [13]

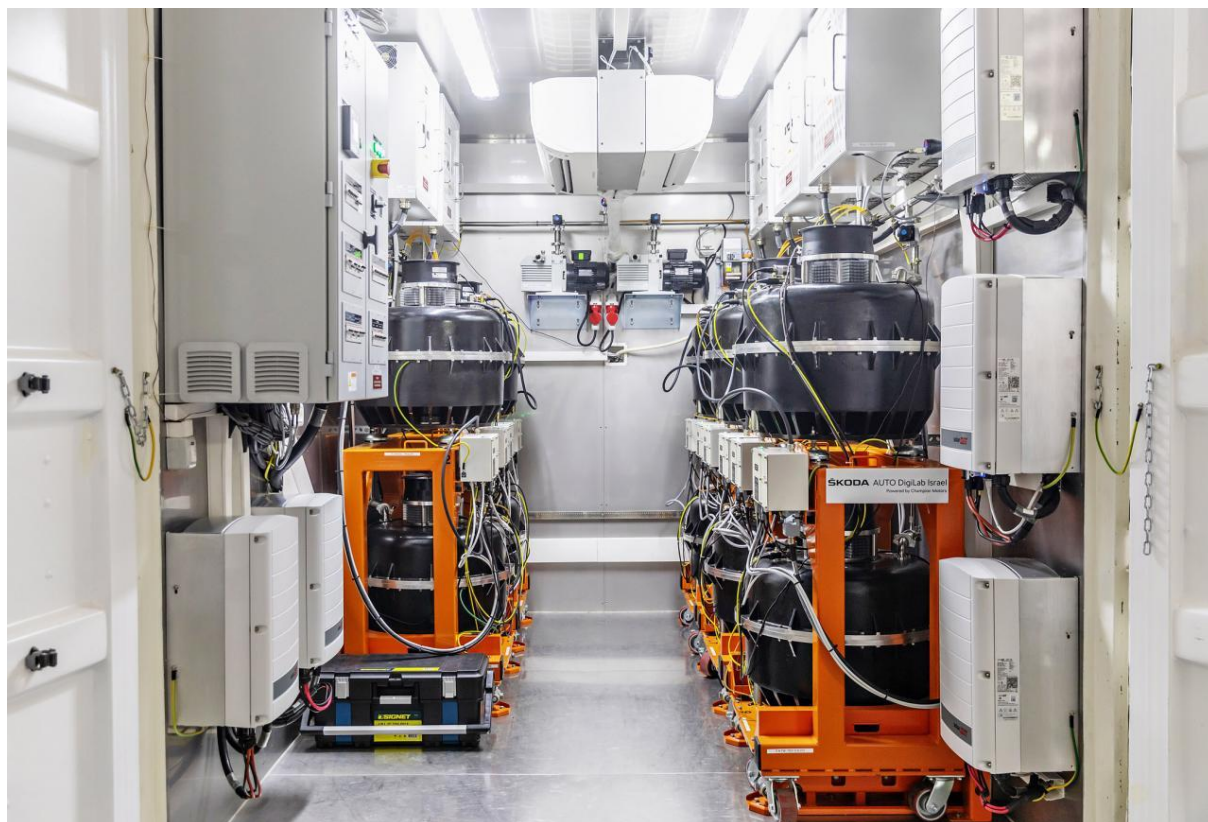
Výhody	Nevýhody
Velmi vysoká životnost (více jak 20 let) s téměř neomezeným počtem provozních cyklů (více jak 100 000)	Velmi vysoké samovybití
Velmi rychlá odezva	Nižší energetická účinnost (než Li-ion)
Vysoký měrný výkon	Větší rozměry zařízení
Vysoká měrná energie	Nutnost umístění do stoprocentní roviny
Nezávadné pro životní prostředí	Nebezpečné v případě poruchy
Menší náchylnost na změnu okolní teploty	Vysoké investiční náklady (přibližně jako superkapacitor)
SoC není ovlivňován stárnutím nebo teplotou	
Velmi nízké požadavky na provoz a údržbu	
Možnost velmi rychlého nabití a vybití	
Hluboké vybití nemá žádný negativní vliv	

### **Kinetic Power Booster**

V České republice je od poloviny listopadu 2019 v pilotním provozu zařízení vyvinuté izraelským startupem Chakratec, se kterým navázala spolupráci Škoda Auto DigiLab Israel, která dále na instalaci spolupracovala se společností PRE. Současně se plánuje v Praze umístit v roce 2020 ještě druhé zařízení této technologie. Systém využívá setrvačnickové systémy, ve kterých je elektrická energie ukládána ve formě kinetické energie. Tato technologie je vhodná nejen pro nabíjení elektromobilů, ale obecně tam, kde jsou velké nárazové odběry elektřiny a kde není k dispozici dostatečná přípojka. Může tak sloužit i jako omezovač čtvrthodinových maxim. Oproti elektrické síti dokáže zdvojnásobit krátkodobě nabíjecí výkon. Velkou výhodou v porovnání s akumulátory je absence elektrochemických článků a tím velmi vysoká životnost s téměř neomezeným počtem provozních cyklů se zachováním stálých parametrů. Výrobce udává životnost 20 let a počet provozních cyklů 200 000.

Celý systém je složen z deseti setrvačnicků, čtyři jsou na jedné straně a šest na druhé straně kontejneru. Hmotnost každého rotoru setrvačnicku je 150 kg. Včetně obalové části váží jeden setrvačnick 250 kg. Rotor se otáčí ve vakuu na magnetických ložiskách. Ačkoli hermetičnost setrvačnickového systému je

velmi dobrá, není stoprocentně dokonalá. Vakuum zajišťují vakuové pumpy, které se spínají pouze při poklesu vakua pod určitou mez (10 militorrů, tedy 1,33 pascalu). Pro roztáčení, případně přeměnu kinetické energie zpětně na elektrickou jsou využívány stejnosměrné stroje. Jednotlivé setrvačníky mají výkon 10 kW a kapacitu 3 kWh. Celkový elektrický výkon setrvačnicků je až 100 kW a kapacita 30 kWh (reálná kapacita je snížena přibližně o účinnost 85 % přeměny kinetické energie na elektrickou). Maximální rychlost otáčení setrvačnicků činí 18 000 otáček za minutu, kterých lze dosáhnout po zhruba 45 minutách. Při nabíjení elektromobilu klesají otáčky postupně až k 7 000 otáček za minutu, v tomto okamžiku je úložiště zcela vybité. Pokud by se setrvačníky přestaly udržovat na plných otáčkách, tak k jejich zastavení dojde za čtyři dny. Při udržování na konstantních otáčkách je úbytek velmi malý a účinnost je poměrně vysoká. Základní energetickou spotřebu si zařízení bere ze sítě. Ačkoli technologie není tolik náchylná na teplotu v porovnání s akumulátory, kromě vlastního chlazení každého setrvačnicku, je celý kontejner vybaven klimatizací pro udržování provozní teploty okolo 20 °C. Připojení je standardně ze střídavého zdroje a setrvačníky dávají přímo stejnosměrný proud do nabíjecích stanic. Přípojka dostačuje do 50 kW, s proudovým zatížením do 125 A. V okamžiku, kdy je systém naakumulovaný, tak dobíjecí stanice dokáže poskytnout až 100 kW. Pokud jsou setrvačníky roztočené, lze nějakou dobu elektromobily dobíjet i při výpadku vnější sítě, klesá ale napětí a setrvačníky se postupně zpomalují.



Obr. 1-8 Pohled do kontejneru se setrvačníky (zdroj: Škoda Auto DigiLab)

Setrvačníky se podle zatížení připínají postupně a v nastaveném poměru vzhledem k síti. Například, nabíjí-li se elektromobil výkonem 36 kW, zařízení si bere 18 kW ze sítě a zbytek ze setrvačnicků s tím, že jsou připojeny pouze dva setrvačníky. Setrvačníky mohou dodávat výkon přibližně patnáct až dvacet minut. Na roztáčení systém potřebuje 3 kW ze sítě a 47 kW může jít do dobíjecích stanic. Pokud probíhá nabíjení elektromobilu stejnosměrně, nabíjecí stanice si bere 47 kW ze sítě a dalších necelých 50 kW můžou přidat setrvačníky. Pořizovací náklady jsou přibližně 3 mil. Kč. Zároveň není snadné tuto

dobíjecí stanici postavit ve smyslu stavebního řízení, musí na ni být standardní stavební řízení, územní souhlas, povolení k připojení atd. Při instalaci je nutné kontejner umístit do stoprocentní roviny a vyvážit setrvačníky. V případě, že jsou setrvačníky dokonale vyvážené, nedochází k vibracím, nicméně celý kontejner může být případně umístěn na gumových silentblocích. Nevýhodou v porovnání s kompaktním outdoorovým akumulátorovým systémem je, že kontejner zabere větší užitnou plochu.

[12]

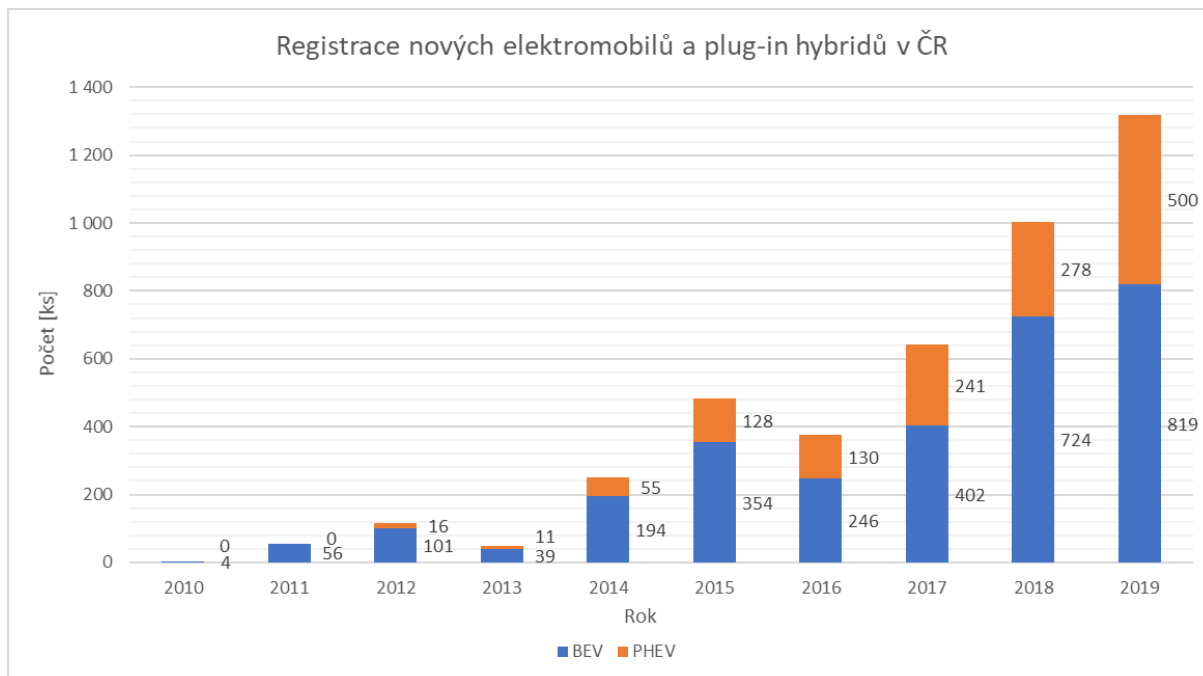
## 1.7 Shrnutí

Z výše uvedeného přehledu různých možností akumulace elektrické energie se v současné době, dle mého názoru, nejvíce hodí pro podporu dobíjecích stanic elektromobilů v místech s nedostatečnou elektrickou přípojkou Li-ion akumulátory. Jejich nespornou výhodou oproti ostatním akumulátorům je vyšší měrná energie, vyšší počet provozních cyklů, velmi nízké samovybíjení, bezúdržbovost a jejich dostupnost. Nevýhodou jsou jejich vyšší investiční náklady, nicméně přepočtené náklady na provozní cyklus jsou díky delší životnosti nízké. Dále mě k tomuto závěru vedou nevýhody, které převažují u ostatních systémů. Například ještě vyšší investiční náklady u setrvačnicků nebo superkapacitorů, nutnost pomalého nabíjení, krátká doba dodávky elektrické energie, pomalá odezva na změnu zátěže, nižší měrný výkon, nižší účinnost, nutnost udržování vysoké nebo naopak velmi nízké teploty, stádium vývoje a výzkumu atd.

## 2 Elektromobilita a dobíjecí infrastruktura

### 2.1 Současný stav elektromobility

V České republice není vývoj elektromobility nikterak závratný. Dle dat z EAFO (European Alternative Fuels Observatory [16]) docházelo za posledních deset let každoročně k registraci nových elektromobilů (BEV) nebo plug-in hybridů (PHEV) pouze v řádech desítek až stovek kusů. Tento průběh včetně jednotlivých počtů vozů je zobrazen na následujícím grafu. Ve statistice jsou zahrnuty osobní automobily a lehké užitkové vozy.



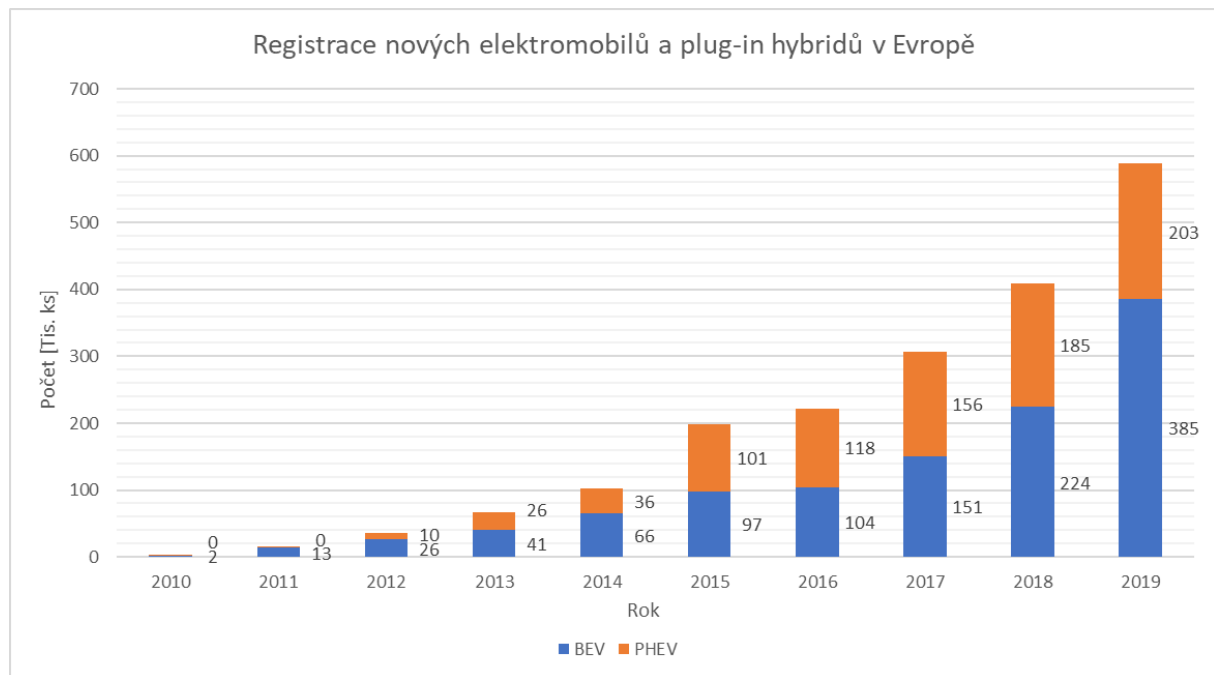
Obr. 2-1 Registrace nových elektromobilů a plug-in hybridů v letech 2010-2019 v ČR (kategorie M1 a N1), dle [16]

Během roku 2019 bylo celkem zaregistrováno dle statistik Svazu dovozců automobilů (SDA [15]) 270 351 nových osobních automobilů a lehkých užitkových vozů poháněných palivem všeho druhu. Pokud k této hodnotě vztáhneme počet elektromobilů zaregistrovaných v daném roce, dostaneme procentuální hodnotu 0,3 %. V případě plug-in hybridů je to méně než 0,2 %. Dohromady podíl registrací nových elektrifikovaných vozů činil necelé 0,5 %.

Celkový vozový park na konci roku 2019 čítal 6 576 724 vozů. Z toho elektromobilů bylo přibližně 4 000 a plug-in hybridů 1 500 ks. Podíl automobilů s elektrickým pohonem ve vozovém parku na konci roku 2019 činil v konečném výsledku přibližně 0,08 %. Dá se tedy říci, že počet těchto vozů byl téměř zanedbatelný. Nicméně již za první tři měsíce roku 2020 bylo registrováno více elektromobilů a plug-in hybridů než za celý rok 2019. Zdá se, že letošní rok bude opravdu zlomový a budeme na silnicích potkávat ztelněji více elektromobilů. To je dáno větším portfoliem a produkcí těchto vozů automobilkami, které se tak snaží plnit emisní limity z prodaných automobilů.

Určitě do ČR zavítají také elektromobilisté z okolních států. Ať už k nám přijedou jako do konečné destinace, nebo budou ČR pouze projíždět, lze předpokládat jejich případnou potřebu využití dobíjecí infrastruktury. Pro porovnání je níže uveden také graf počtu nově registrovaných elektromobilů a plug-in hybridů v rámci Evropy. Trend narůstajícího počtu elektrických vozů je obdobný jako pro ČR. V loňském roce bylo v Evropě zaregistrováno 385 100 nových elektromobilů a 202 700 plug-in hybridů. Elektromobily se podílely na celkovém počtu nově registrovaných vozů v průměru 2,1 % a plug-in

hybridů 1,2 %. Nejvyšší podíl nových registrací elektrických vozů opět dosáhlo Norsko s až 56 %, za ním se s největším podílem registrací umístilo Irsko (25 %), Nizozemsko (15 %), Švédsko (11 %) a Finsko (7 %). Celkem bylo v Evropě na konci roku 2019 přibližně 1 099 000 elektromobilů a 823 000 plug-in hybridů. Z čehož nejvíce elektrických vozů jezdí v již zmíněném Norsku (335 100) a na druhém místě je s námi sousedící Německo (309 700).



Obr. 2-2 Registrační nových elektromobilů a plug-in hybridů v letech 2010-2019 v Evropě (EU+UK+ESVO+Turecko, kategorie M1 a N1), dle [16]

Z grafu registrací nových elektromobilů a plug-in hybridů v ČR je patrné, že každým rokem převládaly čisté elektromobily nad plug-in hybridy. V počátcích rozvoje elektromobility se tvrdilo, že hybridní pohony budou tvořit jakýsi most mezi automobily se spalovacími motory a čistými elektromobily. Hybridních pohonů existuje celá řada různých typů. Dle statistik SDA opravdu registrace všech automobilů s hybridními pohony převládají nad čistě elektrickými vozidly. Z pohledu této práce jsou ale zajímavé typy pohonů, které lze dobíjet externě, což jsou právě plug-in hybridy a čisté elektromobily.

[15], [16]

Abych mohl dále vytvořit model vytíženosti navrhované dobíjecí stanice, zanalyzoval jsem různé současné, popřípadě budoucí modely vozidel, jejichž základní parametry jsou uvedeny v tabulkách níže. Hlavní parametr, který mě s ohledem na návrh rychlodobíjecí stanice zajímá, je maximální výkon DC dobíjení. Elektromobil si totiž dobíjecí výkon řídí sám s ohledem na mnoho parametrů, např. stav nabití akumulátoru nebo jeho teplotu. Pokud by tedy elektromobil např. nevladl aktivní chlazení akumulátoru, mohlo by dojít při nabíjení vysokým výkonem k jeho zahřátí nad dovolenou mez, což by mohlo způsobit jeho zničení až vznik požáru. Z tohoto důvodu nebo kteréhokoli jiného hardwarového i softwarového omezení si dokáže elektromobil vzít určitý omezený maximální výkon, a to i kdyby dobíjecí stanice umožňovala dobíjení daleko vyšším výkonem. V případě AC dobíjení je vždy využívána nabíječka, která je přímo zabudována ve voze a její výkon je limitující. Pokud bychom chtěli dobíjet elektromobil z AC dobíjecí stanice nebo wallboxu s vyšším výkonem, tak dobíjení bude probíhat maximálně výkonem konkrétní nabíječky ve vozidle. Chceme-li elektromobil dobít rychleji, musíme využít DC dobíjení, které obchází vnitřní nabíječku a zpravidla umožňuje nabíjení vyšším výkonem. Další parametr, který jsem do přehledových tabulek zařadil je kapacita akumulátoru a její využitelná část. Jak bylo zmíněno dříve, akumulátorům z hlediska životnosti neprospívá jejich úplné vybití

a nabíjení. Z tohoto důvodu mívají elektromobily určitou část kapacity akumulátoru blokovanou. Pokud se na uživatelském rozhraní ve vozidle zobrazuje stav nabití akumulátoru 0 %, ve skutečnosti může mít SoC např. 5 %. Podobná mez je i u 100 %, kdy akumulátor může být ve skutečnosti nabit pouze např. na 95 % a dále je již nabíjení blokováno. Některé modely elektromobilů jsou vyráběny v různých verzích s rozdílnými kapacitami akumulátorů a maximálním výkonem dobíjení, popřípadě mohlo docházet k zvyšování kapacity nebo maximálního výkonu dobíjení vývojem nových modelových řad, z tohoto důvodu je uvedeno v tabulce více hodnot. Posledním parametrem je dojezd dle celosvětové harmonizované metodiky měření spotřeby (WLTP). Nižší hodnota dojezdu odpovídá nejnižší kapacitě akumulátoru a vyšší hodnota dojezdu odpovídá nejvyšší kapacitě akumulátoru. Jednotlivé modely jsou v tabulkách seřazeny sestupně podle jejich počtu v ČR na konci roku 2019, dle statistik EAFO. Počty prvních deseti vozidel jsou přesné (dle EAFO), protože dané statistiky zveřejňují pro každý rok 10 modelů s největším zastoupením ve vozovém parku a 10 modelů nejvíce registrovaných během roku, z nich jsem zpětně dopočítával další vozidla (s pomocí statistik SDA) a jejich počet je pouze orientační, může jich být více.

První tabulka reprezentuje nejvíce zastoupené elektromobily v kategorii osobních automobilů v ČR. V počátku šlo elektromobily většinou dobíjet maximálním výkonem 50 kW, což zapříčinilo ve velké míře budování dobíjecích stanic poskytujících taktéž maximálně 50 kW. Jistou výjimku tvořily vozy společnosti Tesla, které akceptovaly vyšší výkony. Vidíme, že nejvyšší výkon dobíjení v současné době umožňuje Tesla model 3, a to až 250 kW. Na dalších pozicích je taktéž Tesla s posledními vylepšenými verzemi Modelu S a X, které lze dobíjet až 200 kW. Dále za zmínku stojí Audi e-Tron, který se dobíjí až 150 kW. Vyšším výkonem lze obecně dobíjet elektromobily s větší kapacitou akumulátoru. Zmíněné vozy společnosti Tesla mají kapacitu akumulátorů okolo 60-100 kWh, díky tomu mají také větší dojezd (300-600 km). U elektromobilů s menším dojezdem (100-300 km) se kapacita akumulátorů pohybuje většinou okolo 16-40 kWh.

Tab. 2-1 Nejvíce zastoupené elektromobily v kategorii OA ve vozovém parku ČR (2019), dle [16], [15], [20], [21]

Model	Počet v ČR [ks]	Kapacita akumulátoru [kWh]	Využitelná kapacita akumulátor [kWh]	Max. výkon DC dobíjení [kW]	Max. výkon AC dobíjení [kW]	Dojezd (WLTP) [km]
BMW i3	463	21,6; 33,2; 42,2	18,8; 27,2; 38	50	7,4; 11	150-310
Volkswagen e-Golf	457	24,2; 35,8	20,5; 32	40	3,7; 7,2	150-230
Nissan Leaf	446	24; 30; 40; 62	22; 28; 38; 60	50; 100	3,3; 6,6	136-385
Volkswagen e-UP!	291	18,7; 36,8	16; 32,3	40	3,7; 7,2	133-265
Tesla Model S	269	70; 75; 85; 90; 100	66,5; 72,5; 80,8; 83,5; 94	105; 120; 200	11; 16,5; 22	355-610
Hyundai Ioniq Electric	143	30,5; 40	28; 38,3	70; 50	6,6; 7,2	222-293
Tesla Model X	113	75; 90; 100	72,5; 83,5; 87; 95	120; 150; 200	11; 16,5	310-505
Peugeot iOn	93	16	14,5	40	3,7	106
Nissan e-NV200 Evalia	74	24; 40	22; 38	50	3,3; 6,6	130-200
Tesla Model 3	73	55; 65; 80	50; 62; 74	150; 250	7,7; 11	459-560
Jaguar i-Pace	60	90	84,7	100	7,4	470
Hyundai Kona Electric	51	42; 67,1	39,2; 64	50; 80	7,2; 11	289-449
Audi e-Tron	47	95	83,6	150	11	417
Citroen C-Zero	45	16	14,5	40	3,7	106
Kia e-Soul	33	30,5; 33; 42; 67,1	27; 30; 39,2; 64	50; 80; 100	3,6; 6,6; 7,2	170-452
Škoda CITIGOe iV	28	36,8	32,3	40	7,2	265
Renault Zoe	16	25; 41; 50	22; 37; 47	0; 50	22; 43	169-390

V druhé tabulce jsou uvedeny vybrané elektromobily, které se nově vyrábí, nebo které by se měly začít sériově vyrábět do 3 let. Aktuálně se již vyrábí Porsche Taycan, které lze dobít nejvyšším výkonem až 270 kW. Sportovní verze tohoto modelu Taycan Cross Turismo, jehož produkce by měla začít na konci tohoto roku, bude umožňovat dobíjení dokonce až 350 kW. Koncepty sportovních vozů v nejbližší době zatím cílí právě na oněch 350 kW dobíjecího výkonu (Audi e-Tron GT, Tesla Roadster atd.). Trendem je zkracovat dobu dobíjení zvyšováním maximálního výkonu dobíjení nad hranici 100 kW, s postupným navyšováním kapacity akumulátorů na vyšší desítky kWh. Tesla plánuje osadit nový Roadster a velký pickup Cybertruck až 200 kWh akumulátory, čímž se chce dostat k mezníku dojezdu 1 000 km na jedno nabití.

Tab. 2-2 Vybrané elektromobily, které se nově začaly vyrábět nebo jsou ve fázi konceptu a jejich produkce by měla začít do 3 let, dle [20], [21]

Model	Začátek produkce	Kapacita akumulátoru [kWh]	Využitelná kapacita akumulátor [kWh]	Max. výkon DC dobíjení [kW]	Max. výkon AC dobíjení [kW]	Dojezd (WLTP) [km]
Kia e-Niro	2018	42; 67,1	39,2; 64	50; 80; 100	7,2	289-455
Mercedes-Benz EQC	2019	80	78	110	7,4	425
Peugeot e-208	2019	50	47,5	100	7,4; 11	350
Porsche Taycan	2019	79,2; 93,4	71; 83,7	225; 270; 350	11; 22	407-462
Volkswagen ID.3	2019	48; 62; 83	45; 58; 77	50; 100; 125	7,2; 11	330-550
Tesla Model Y	2020	60; 75; 80	56; 72,5; 74	120; 250	11	435-530
BMW iX3	2020	80	74	150	11	400
Volvo XC40 Recharge	2020	78	75	150	11	400
Volkswagen ID.4	2020	82	77	125	11	450
Ford Mustang Mach-E	2020	75,7; 98,8	70; 90	115; 150	11	420-600
Škoda ENYAQ	2020	82	77	125	11	500
Audi e-Tron GT	2021	90	85	350	11	488
Tesla Roadster	2021	200	-	350	22	1150
Tesla Cybertruck	2022	100; 120; 200	-	250	11	500-1000

Další tabulka obsahuje vybrané elektromobily v kategorii lehkých užitkových vozů, které byly registrovány v ČR. V porovnání s osobními automobily zpravidla používají paradoxně kapacity akumulátorů v nižších mezích, a pokud lze vůbec tyto elektromobily dobít stejnosměrným proudem, tak pouze maximálně 60 kW. Právě pomalejší dobíjení, a ne příliš velký dojezd může působit limitujícím dojmem, a proto nejsou lehké užitkové elektromobily ve větší míře používány, např. městskými kurýry.

Tab. 2-3 Nejvíce zastoupené elektromobily v kategorii LUV ve vozovém parku ČR (2019), dle [16], [15], [20], [21]

Model	Počet v ČR [ks]	Kapacita akumulátoru [kWh]	Využitelná kapacita akumulátor [kWh]	Max. výkon DC dobíjení [kW]	Max. výkon AC dobíjení [kW]	Dojezd (WLTP) [km]
Nissan e-NV200	69	24; 40	22; 38	50	3,3; 6,6	130-200
Renault Kangoo Z.E.	24	22; 33	20; 31	-	3,7; 7,4	131-201
Peugeot Partner Electric	23	22,5	20,5	40	3,7	130
Citroen Berlingo Electric	5	22,5	20,5	40	3,7	130
StreetScooter Work	2	40	-	-	11	159
Volkswagen e-Crafter	2	35,8	-	40	7,2	115-159
SAIC Maxus EV80	2	56; 75	53; 71	60	7	230 (NEDC)
Mercedes-Benz eVito	2	41	35	-	7,2	150



V poslední tabulce jsou zaznamenány vybrané plug-in hybridy v kategorii osobních automobilů, které byly registrovány v ČR. Kapacity akumulátorů se u nich pohybují v jednotkách až nižších desítkách kWh, což převážně odpovídá dojezdu na elektrickou energii do 60 km. Až na dvě výjimky je většinou nelze dobíjet stejnosměrně. V případě BMW i3 REx, které lze dobíjet až 50 kW stejnosměrně, se jedná o tzv. range extender, neboli prodlužovač dojezdu. Hlavní pohon je elektrický, navíc obsahuje malý spalovací motor, který funguje jako generátor a vyrábí elektrickou energii v případě, že je vybitý akumulátor. Tím se odlišuje od ostatních plug-in hybridů, které využívají jako hlavní pohon spalovací motor, který může být podpořen elektromotorem pro dosažení vyššího výkonu, nebo je vozidlo přímo poháněno pouze elektromotorem, obvykle při nižších rychlostech (po omezenou vzdálenost).

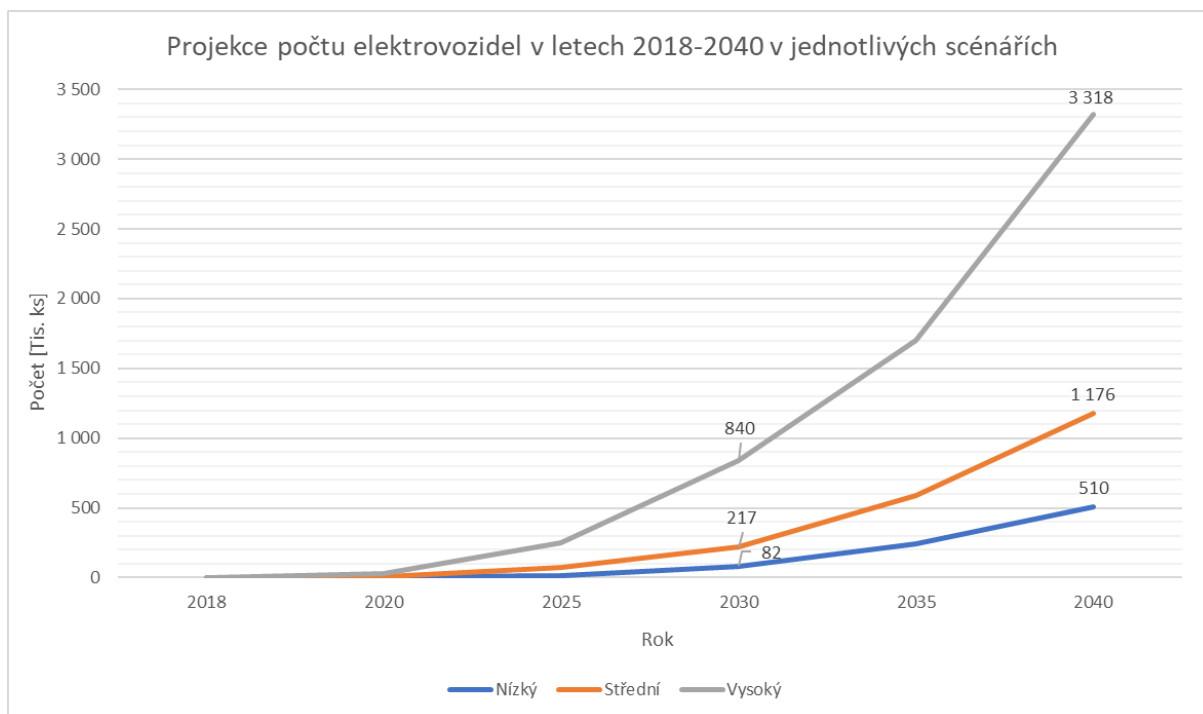
Tab. 2-4 Nejvíce zastoupené plug-in hybridy v kategorii OA ve vozovém parku ČR (2019), dle [16], [15], [20], [21]

Model	Počet v ČR [ks]	Kapacita akumulátoru [kWh]	Využitelná kapacita akumulátor [kWh]	Max. výkon DC dobíjení [kW]	Max. výkon AC dobíjení [kW]	Dojezd (WLTP) [km]
Mitsubishi Outlander PHEV	119	12; 13,8	9; 11	22	3,7	35-45
BMW i3 REx	118	21,6; 33,2	18,8; 27,2	50	7,4; 11	150-220
BMW X5 40e	99	9; 12	7,5; -	-	3,7	24-60
Volkswagen Passat GTE	94	9,9; 13	8; 11	-	3,7; 3,6	37-55
BMW i8	86	7,1; 11,7	5,3; 9,4	-	3,7	26-45
Škoda Superb iV	85	13	10,4	-	3,6	55
Volvo XC90 PHEV	81	10,4	9	-	3,7	29
Hyundai Ioniq PHEV	75	8,9	7,1	-	3,3	48-52
Mini Countryman PHEV	63	7,6	6,5	-	3,7	29
BMW 530e	54	9,2	8	-	3,7	39
Porsche Panamera PHEV	41	9,4; 14	8; 13	-	3,6	21-41
Toyota Prius PHEV	34	4,4; 8,8	3,4; 7	-	3,7	19-43
Audi A3 e-Tron	31	8,8	7	-	3,7	40
Volvo V60 PHEV	17+	10,4; 11,2	9; 10	-	3,7	48-58
Mercedes-Benz GLC350e	16+	8,8	7,6	-	3,7	22
Land Rover Range Rover PHEV	14	12,4	11	-	7	29
Kia NIRO PHEV	12	8,9	7,1	-	3,3	41
Volkswagen Golf GTE	11+	8,7	7	-	3,7	37
Audi Q7 e-Tron	3+	17,3	15	-	7,4	42

[16], [15], [20], [21]

## 2.2 Očekávaný rozvoj elektromobility

Návrh Aktualizace Národního akčního plánu čisté mobility (NAP CM [18]) z roku 2019 (schválen 27. 4. 2020), využívá pro predikci vývoje elektromobility v ČR do roku 2030 studii vypracovanou v rámci Národního akčního plánu pro chytré sítě (NAP SG [19]). Budoucí vývoj je obtížné s jistotou odhadnout. Záleží na mnoha faktorech, a proto byly v této studii vytvořeny tři scénáře s poměrně velkým rozptylem v konečném roce 2040, viz následující graf.



Obr. 2-3 Projekce počtu elektrovozidel v letech 2018-2040 v jednotlivých scénářích ve všech kategoriích (osobní, lehké užitkové a nákladní automobily, autobusy (MHD)), dle [19]

Z této studie jsem vybral předpokládané počty osobních automobilů a lehkých užitkových vozů pouze pro čisté elektromobily (BEV), které lze dobít vysokým výkonem. S těmito hodnotami budu dále počítat při návrhu dobíjecí stanice. Jejich zaokrouhlené počty pro dané roky jsou uvedeny v tabulce níže.

Tab. 2-5 Očekávaný počet osobních automobilů a lehkých užitkových vozů typu BEV, dle [19]

Scénář / časový řez	2020	2025	2030	2035	2040
Nízký	3 800	7 000	33 000	113 000	266 000
Střední	4 900	31 000	88 000	304 000	705 000
Vysoký	19 000	174 000	571 000	1 172 000	2 326 000

Pro zajímavost je v následující tabulce uveden zaokrouhlený počet elektromobilů (BEV) společně s plug-in hybridy (PHEV) v kategorii osobních automobilů pro jednotlivé scénáře, který vychází ze zmíněné studie a je uveden v navrhované Aktualizaci NAP CM s výhledem do roku 2030.

Tab. 2-6 Očekávaný počet osobních automobilů typu BEV a PHEV [18]

Scénář / časový řez	2020	2025	2030
Nízký	4 000	11 000	74 000
Střední	9 000	71 000	200 000
Vysoký	24 000	233 000	800 000

V dalších tabulkách jsou očekávané počty v jednotlivých kategoriích vozidel pro tři scénáře vývoje k roku 2030, dále je zde i jejich podíl ve vozovém parku dané kategorie a předpokládaná spotřeba elektrické energie za rok.

Tab. 2-7 Projekce počtu vozidel v r. 2030 – nízký scénář [18]

Kategorie vozidel	Počet vozidel	Podíl na celku	Spotřeba v GWh
Osobní vozy (kat. M1)	74 000	1,33 %	110
Autobusy (kat. M2, M3)	300	1,34 %	25
Užitkové vozy (kat. N1, N2, N3)	7 000	0,95 %	90

Tab. 2-8 Projekce počtu vozidel v r. 2030 – střední scénář [18]

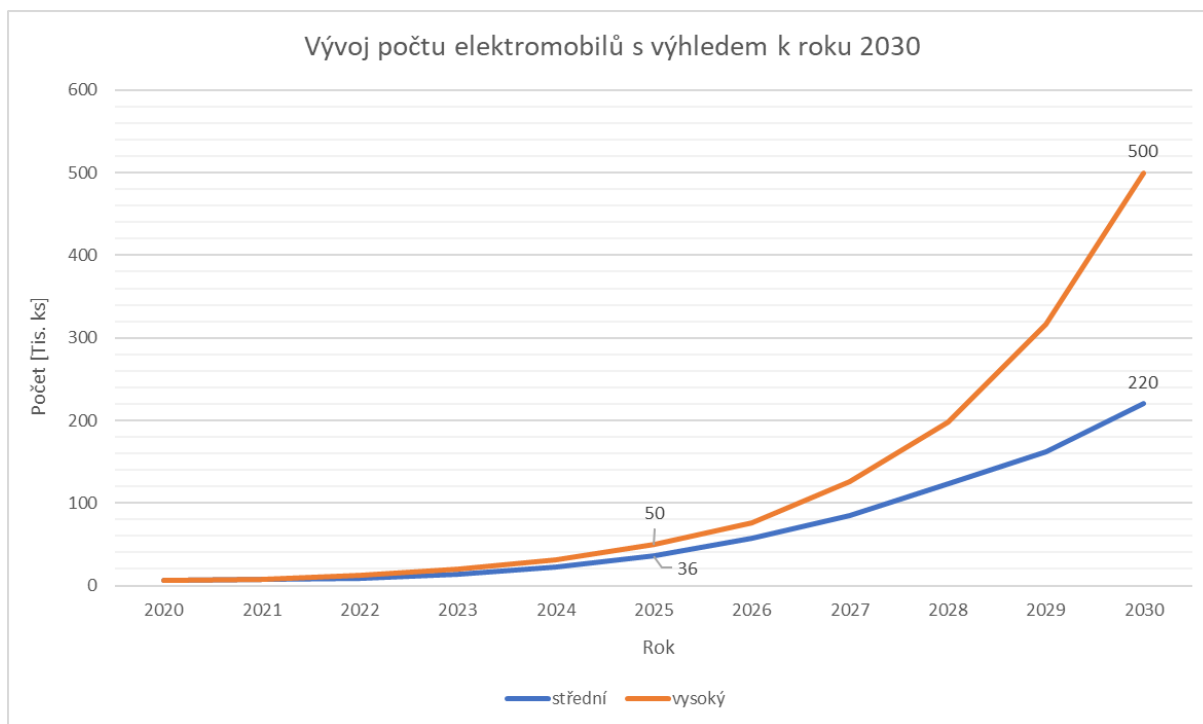
Kategorie vozidel	Počet vozidel	Podíl na celku	Spotřeba v GWh
Osobní vozy (kat. M1)	200 000	3,59 %	300
Autobusy (kat. M2, M3)	500	2,72 %	50
Užitkové vozy (kat. N1, N2, N3)	16 000	2,17 %	200

Tab. 2-9 Projekce počtu vozidel v r. 2030 – vysoký scénář [18]

Kategorie vozidel	Počet vozidel	Podíl na celku	Spotřeba v GWh
Osobní vozy (kat. M1)	800 000	14,04 %	1 100
Autobusy (kat. M2, M3)	1 000	4,56 %	90
Užitkové vozy (kat. N1, N2, N3)	45 000	5,94 %	600

Aktualizace NAP CM také odkazuje na alternativní predikci vytvořenou SDA, která má nejbližší ke střednímu scénáři dříve zmíněné studie. Tato studie předpokládá, že by v roce 2025 mohlo být celkem 68 200 elektromobilů čistě v individuální automobilové dopravě, což by představovalo přibližně 1,1 % vozového parku (do 10 % přírůstku ročních registrací). A následně o pět let později 217 000 elektrických vozidel, se zastoupením ve vozovém parku 3 % (do 15 % přírůstku ročních registrací). Pro představu, za rok 2025 je zde předpoklad nových registrací el. vozidel 21 000 a za rok 2030 již 35 000.

S ohledem na tyto predikce stanovuje Aktualizace NAP CM předpokládaný budoucí vývoj počtu elektromobilů (osobní automobily, nákladní vozidla a autobusy) jako interval, viz následující graf. Nižší hranici tvoří v podstatě zmíněné predikce SDA a předpokládá 220 000 elektromobilů v roce 2030. Horní hranice je zvolena pro počet 500 000 elektromobilů k roku 2030. Tento počet zhruba odpovídá 7 % vozového parku. Zvolená horní hranice leží přibližně mezi středním a vysokým scénářem z predikce pro NAP SG.



Obr. 2-4 Vývoj počtu elektromobilů s výhledem k roku 2030, dle [18]

V následujících letech se již počítá s větším zájmem i o ojetá vozidla, která díky jejich nižší ceně mohou být akceptována zájemci o elektromobily, kteří by si je jinak nemohli pořídit. Počet elektrických autobusů se k roku 2030 odhaduje na 800 až 1 200 kusů (bez trolejbusů). V případě elektromobility v nákladní dopravě je třeba budovat infrastrukturu ultrarychlého dobíjení (150–350 kW). Předpokládá se, že elektrická nákladní vozidla se budou využívat hlavně pro zásobování ve městech v rámci tzv. city logistiky.

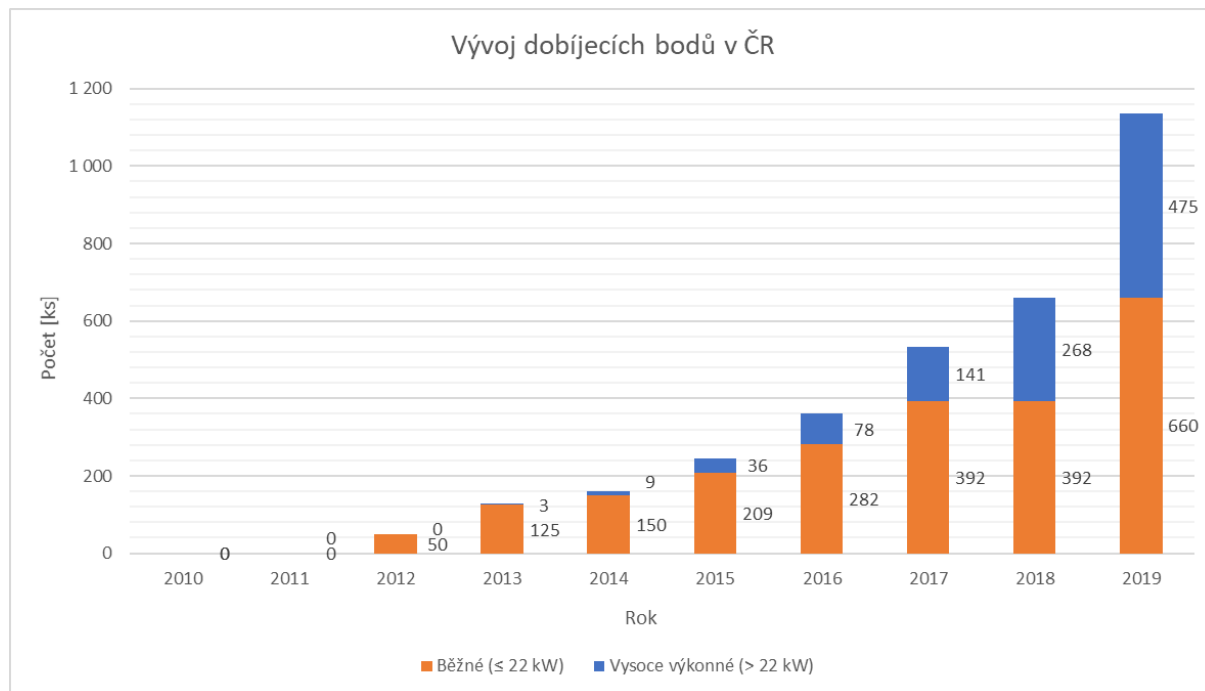
[18]

## 2.3 Současný stav dobíjecí infrastruktury

Současně s postupným přibýváním nových elektromobilů dochází taktéž k rozšiřování dobíjecí infrastruktury. Nejvíce se u nás na budování a provozování veřejných dobíjecích stanic podílejí energetické společnosti ČEZ, E.ON a PRE. Dále zde najdeme několik dobíjecích stanic od Tesly (Superchargers, Destination Charging), do rozšiřování počtu dobíjecích stanic se zapojila také síť čerpacích stanic MOL, dále zde je vysoce výkonná dobíjecí stanice společnosti IONITY a samozřejmě umožňují dobíjení elektromobilů i různé restaurace, obchody, hotely, sportovní centra a podobné provozovny, převážně pomocí tzv. wallboxů nebo i klasických elektrických zásuvek.

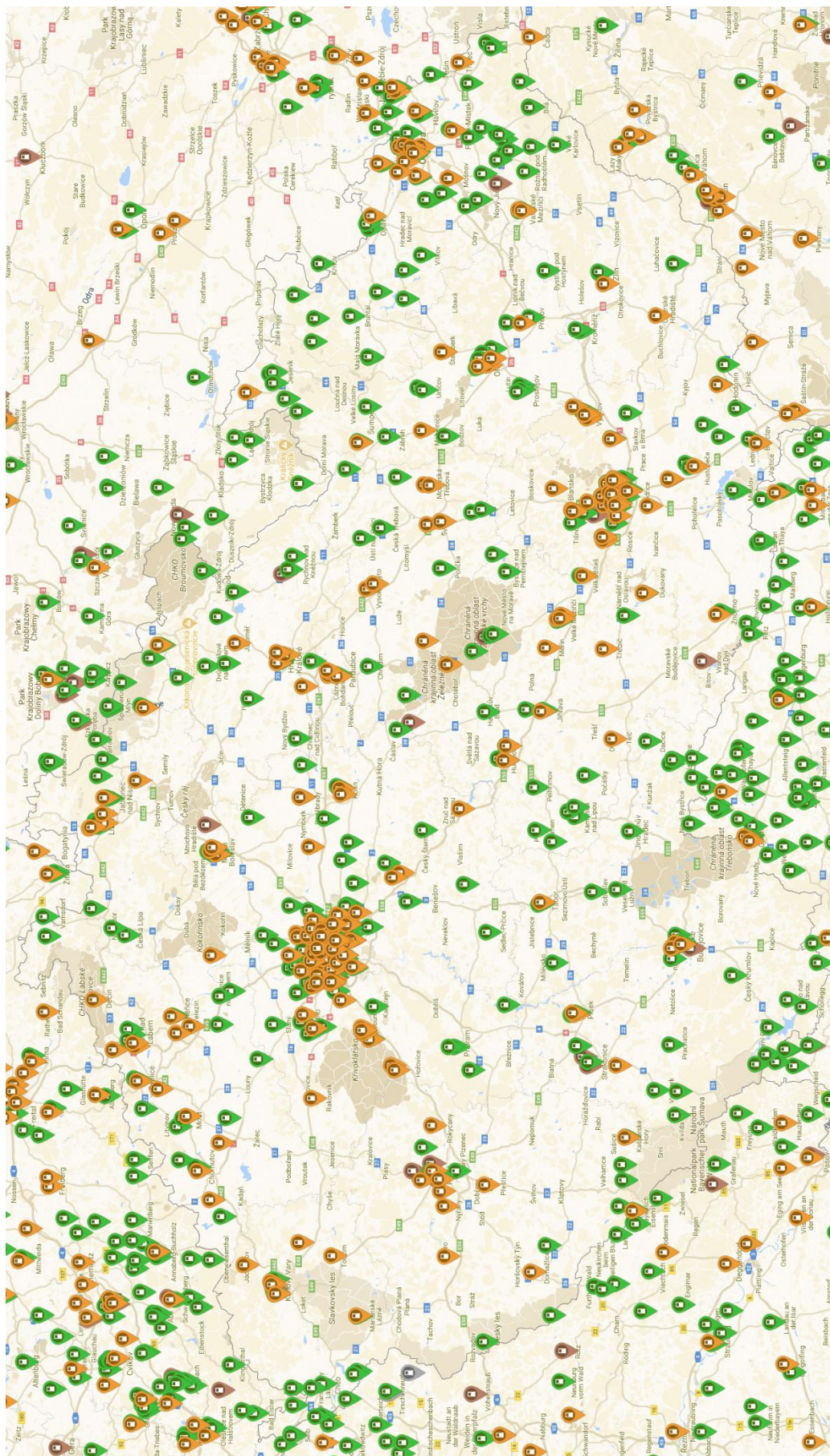
Dle statistiky EAFO bylo na konci roku 2019 v ČR až 1 135 veřejných dobíjecích bodů. Z toho bylo 660 běžných ( $\leq 22$  kW) a 475 vysoce výkonných ( $> 22$  kW). Postupný vývoj jejich počtu je opět graficky zobrazen na následujícím grafu. K 31. 10. 2019 bylo dle statistiky MPO, do které by měly být povinně nahlášeny všechny veřejné dobíjecí stanice, 237 lokalit pro dobíjení, s celkem 715 dobíjecími body. Vidíme, že uvedené zdroje se poměrně liší. Bohužel zveřejňované statistiky MPO neuvádějí maximální dobíjecí výkon, ani zda se jedná o AC nebo DC dobíjecí bod. V dané lokalitě může být několik dobíjecích stanic, kdy daný stojan může být vybaven např. dvěma DC dobíjecími konektory

(CCS a CHAdeMO), ale současné dobíjení nemusí být možné. Dobíjecí bod reprezentuje zařízení, které umožňuje dobíjení v určitém okamžiku. V tomto případě by se tyto dva konektory měly brát jako jeden dobíjecí bod. Zároveň ale tento stejný stojan může umožňovat také AC dobíjení, které je zpravidla funkční i v okamžiku, kdy jiný elektromobil využívá DC dobíjení.



Obr. 2-5 Vývoj počtu dobíjecích bodů v letech 2010-2019 v ČR, dle [16]

Jedním z hlavních argumentů, proč se elektromobilita nemůže rychleji rozvíjet, v minulosti bylo, že je zde nedostatečná infrastruktura pro dobíjení. To byla samozřejmě pravda. Ale již jsem několikrát zaznamenal komentář, že infrastruktura pro tak nízký počet elektromobilů, kterých po našich silnicích jezdí, je více než dostatečná. Dle statistiky EAFO připadly na jeden veřejný dobíjecí bod na konci roku 2019 čtyři elektrické vozy (BEV a PHEV). Z tohoto pohledu by mohla být v současné době infrastruktura skutečně dostatečná. Vezmeme-li v úvahu, že majitelé elektromobilů, hlavně s rodinnými domy, mohou nabíjet denně doma a veřejnou síť využívat jen zřídka při dlouhých cestách, na rozdíl od majitelů vozidel se spalovacími motory, kteří musí zpravidla využívat pouze veřejnou síť čerpacích stanic pohonných hmot. Nicméně je třeba se také podívat na rozložení těchto dobíjecích stanic, viz mapa na následující stránce.



Obr. 2-6 Mapa rozložení veřejných dobijecích lokalit v rámci ČR, zelená – běžné, oranžová – vysoce výkonné, hnědá – omezený přístup, (duben 2020) [17]

Vidíme, že největší hustota dobíjecích stanic je hlavně na území Prahy a Brna. Existuje ale mnoho lokalit, kde na vzdálenost několika desítek kilometrů není žádná veřejná dobíjecí stanice, např. v západní části České republiky. A toto může být v případě omezeného dojezdu elektromobilu problém. Proto je třeba vytipovat potřebné lokality a dobíjecí síť rovnoměrně zahustit. Zároveň z nových registrací elektromobilů v prvních měsících letošního roku je patrné, že elektromobilita nabírá na obrátkách. Hlavně vlivem zdlouhavých povolovacích procesů předcházejících výstavbě dobíjecích stanic se může poměrně rychle stát, že veřejná infrastruktura značně zaostane za zvyšujícím se počtem elektromobilů. Když se v současné době přijede k dobíjecí stanici, tak je většinou neobsazená. Nicméně toto se může velmi rychle změnit a budou vznikat nárazově fronty. Již tak delší nabíjení, oproti tankování pohonných hmot, se může načítat o čas potřebný pro nabíjení vozů, které přijely dříve. V tomto vidím největší problém lokalit, kde je vždy jen jeden dobíjecí stojan, případně dva. Pokud bude mít elektromobilista naplánováno nabíjení na dané dobíjecí stanici a v rámci jeho dojezdu nebude jiná dobíjecí stanice, kterou by mohl zkusit, nezbude mu nic jiného než čekat, až se nabije vozidlo před ním. Samozřejmě, že již nyní lze u některých dobíjecích stanic sledovat stav obsazenosti online předem, ale mezitím, než se k dané dobíjecí stanici dojede, se může stav změnit. Některé služby sice můžou umožňovat předem rezervaci na určitý čas, podle mého názoru toto ale není ideální, protože se elektromobilista může vlivem provozu zdržet a dobíjecí stanice je tak blokována pro někoho, kdo by mezitím stihl dobít svůj elektromobil. Z těchto důvodů se chci zaměřit na návrh dobíjecí stanice s větším počtem stojanů, aby měl elektromobilista větší jistotu, že když k této dobíjecí stanici přijede, bude moci ihned začít nabíjet.

[16]

## 2.4 Očekávaný rozvoj dobíjecí infrastruktury

Určit potřebný počet dobíjecích stanic pouze z počtu elektromobilů není ideální. Vlivem různých faktorů jako vývoj technologie dobíjení, vytíženosti stanic nebo chování zákazníků může být potřebný počet různý. Je třeba, aby byly vysoce frekventované silniční tahy pokryty dostatečně hustou sítí rychlodobíjecích stanic. V oblastech, kde dochází k delším zastávkám (obchodní centra, restaurace, zařízení pro volnočasové aktivity atd.) je vhodné instalovat méně výkonné dobíjecí stanice, které zajistí dostatečné dobití za předpokládaný čas strávený elektromobilistou v dané lokalitě. Do těchto lokací by majitelé elektromobilů neměli jezdit primárně pouze z potřeby dobíjení, ale mohou tak spojit příjemné s užitečným a využít čas, kdy by zde vozidlo pouze stálo, pro jeho dobití. Za předpokladu, že si elektromobil pořídí v první řadě lidé, kteří můžou dobíjet doma, případně v práci, bude veřejná infrastruktura méně vytížena. Většinu času totiž bude docházet k dobíjení neveřejně za výhodnějších podmínek a veřejné dobíjecí stanice budou využívány jen při dlouhých cestách. V okamžiku, kdy by si elektromobil pořizovali lidé, kteří nemohou nabíjet neveřejně, bylo by nutné zajistit mnohem hustší infrastrukturu pro dobíjení.

Porovnání tří možných lokalit z pohledu veřejného dobíjení elektromobilů je v následující tabulce.

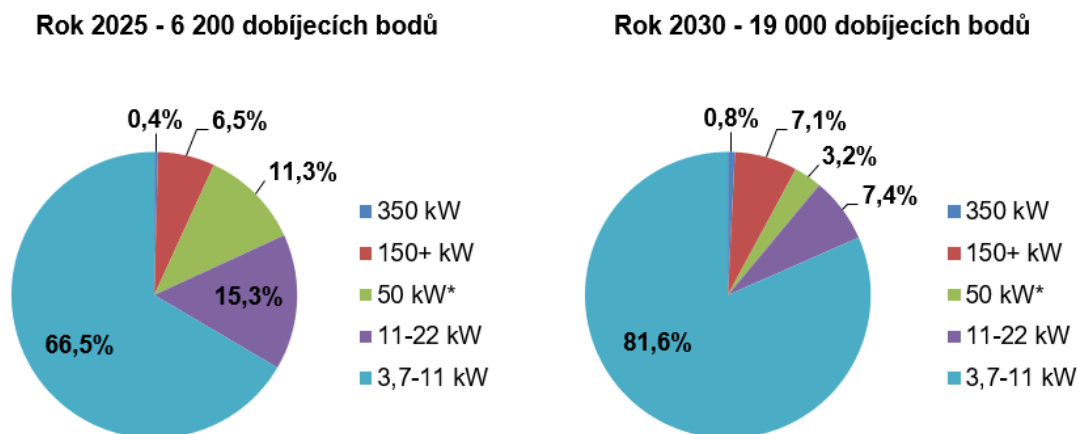
Tab. 2-10 Lokality pro dobíjecí stanice [18]

	„Parkoviště“	„Bod zájmu“	„Tranzit“
Typický příklad	Parkoviště „P+R“	Obchodní centrum	Dálniční odpočívka
Odpovídající čas dobíjení	8-10 hodin	2-3 hodiny	30-60 minut
Výkon dobíjecího bodu	7-11 kW	22-50 kW	100-150+ kW (350 kW)
Typické připojení	NN	LDS, NN, VN	VN

Lokalita „Parkoviště“ odpovídá místu, kde elektromobil stojí několik hodin (přes noc nebo přes den). Nabíjení proto může probíhat nízkým výkonem. Klíčovým parametrem v těchto lokalitách je počet dobíjecích bodů, nikterak jejich výkon.

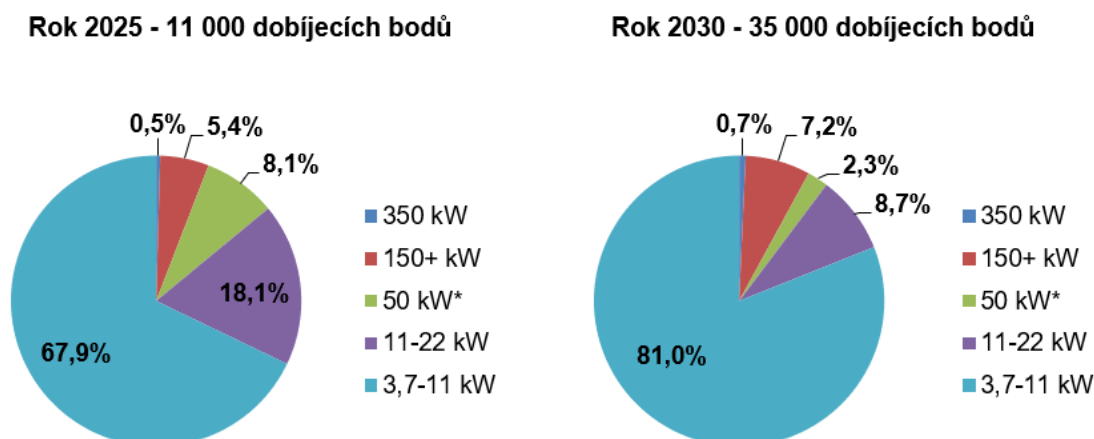
Dle lokalit se budou instalovat dobíjecí stanice různých výkonů (3,7-350 kW) a technologií (AC nebo DC). Postupně s vývojem elektromobilů, obzvláště jejich akumulátorů, se bude stále více přecházet z dnes nejvíce instalovaných 50 kW rychlodobíjecích stanic na vyšší výkony (nad 100 kW). Souběžně s rozvojem elektromobility bude nutné v určitých lokalitách také posilovat elektrizační soustavu. Vhodnějším indikátorem dobíjecí infrastruktury, než prostý počet dobíjecích stanic, je jejich celkový výkon, respektive objem dodané energie. Vzhledem k dříve zmíněné predikci počtu elektromobilů lze odhadnout potřebu dobíjecích stanic, které zajistí dodávku v rozsahu 1 000-1 500 GWh za rok pro střední scénář respektive 2 000-3 000 GWh za rok pro vysoký scénář v roce 2030. Nicméně pro budoucí rozvoj dobíjecích stanic je třeba si stanovit i jejich určitý počet.

Pro scénář s 220 000 elektromobily by měla veřejná dobíjecí infrastruktura v roce 2025 obsahovat 6 200 a v roce 2030 již 19 000 dobíjecích bodů. Jejich orientační rozložení dle výkonů reflektuje následující obrázek.



Obr. 2-7 Veřejně přístupná infrastruktura pro 220 000 vozidel [18]

V rámci scénáře pro 500 000 vozidel by v roce 2025 bylo zapotřebí 11 000 a v roce 2030 již 35 000 dobíjecích bodů.



Obr. 2-8 Veřejně přístupná infrastruktura pro 500 000 vozidel [18]



„Poznámky: \* - počet stanic DC 50 kW do roku 2025 reflektuje instalace s podporou dotačních titulů (CEF, OPD), též zohledňuje fakt, že většina stanic DC 50 kW je typu multistandard, tj. je vybavena i AC dobíjecím bodem (zpravidla s výkonem do 22 kW). V dlouhodobém horizontu se předpokládá, že těžší dobíjení ponесou stanice s výkonem 150 kW a proto počet stanic 50 kW mírně klesá (předpokládá se náhrada stanicemi s vyšším výkonem). Výše uvedené odhady jsou vzhledem k množství nejistot indikativní.“ [18]

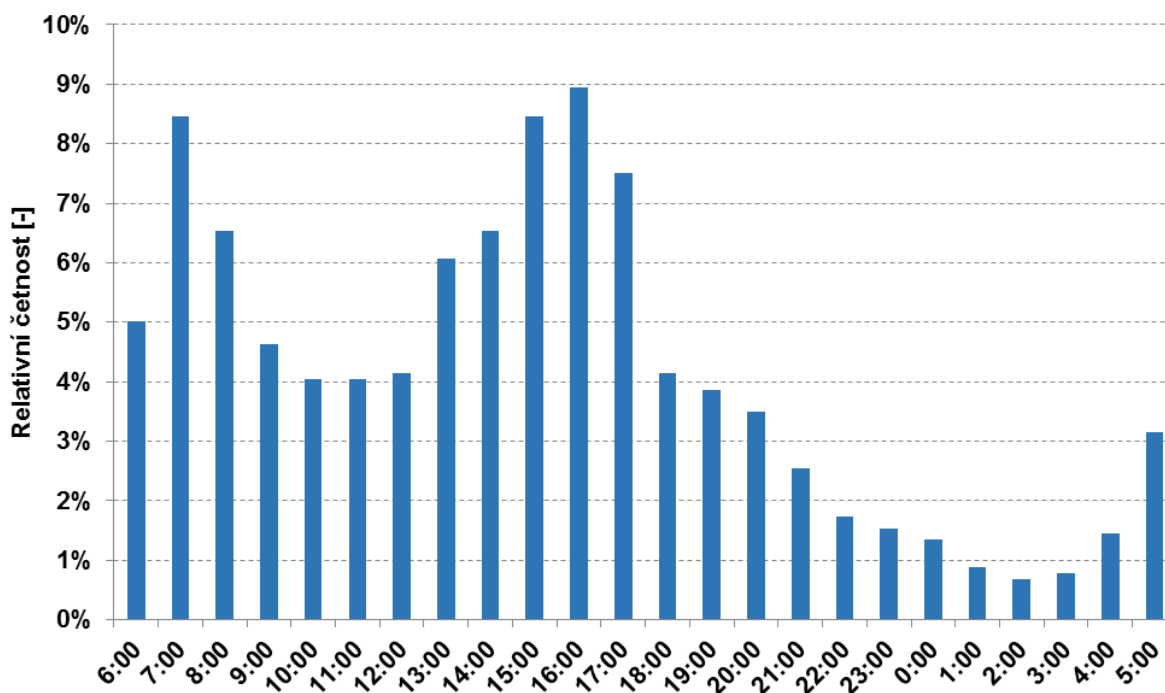
Dle podkladové studie predikce pro NAP SG se dále v rozmezí let 2030-2040 předpokládá přibližně zčtyřnásobení počtu potřebných veřejných dobíjecích stanic oproti roku 2030 pro jednotlivé scénáře.

Současný nízký počet elektromobilů má za následek nízké roční využití rychlodobíjecích stanic. Většinou část dodávky energie zajišťuje pomalé dobíjení, zatímco rychlodobíjení je využíváno pouze nárazově pro dobíjení během dlouhých cest. Jejich zastoupení v infrastruktuře je ale zapotřebí a využití se bude postupně zvyšovat s narůstajícím počtem elektromobilů. Jelikož jsou rychlodobíjecí stanice připojeny převážně do hladiny vysokého napětí, aby mohly poskytovat potřebný výkon, v současné tarifní struktuře dochází k případům, že platba za rezervovanou kapacitu příkonu je nesrovnatelně větší než platba za samotný odběr elektrické energie. Tento problém by v budoucnu měla řešit revize tarifních struktur. Další možností, jak tento nepříznivý jev omezit, je využití akumulátoru, který zajistí menší potřebu rezervovaného příkonu. V této práci se chci zabývat právě využitím akumulčního systému pro tento účel.

[18], [19]

## 2.5 Rozložení časů zahájení dobíjení EV

V rámci mého simulačního programu budu využívat pro generování náhodného okamžiku začátku nabíjení pravděpodobnostní rozdělení zahájení dobíjení na veřejných rychlých dobíjecích stanicích, publikované ve studii Predikce vývoje elektromobility v ČR v rámci NAP SG.



Obr. 2-9 Rozdělení časů zahájení dobíjení veřejného rychlého dobíjení [19]

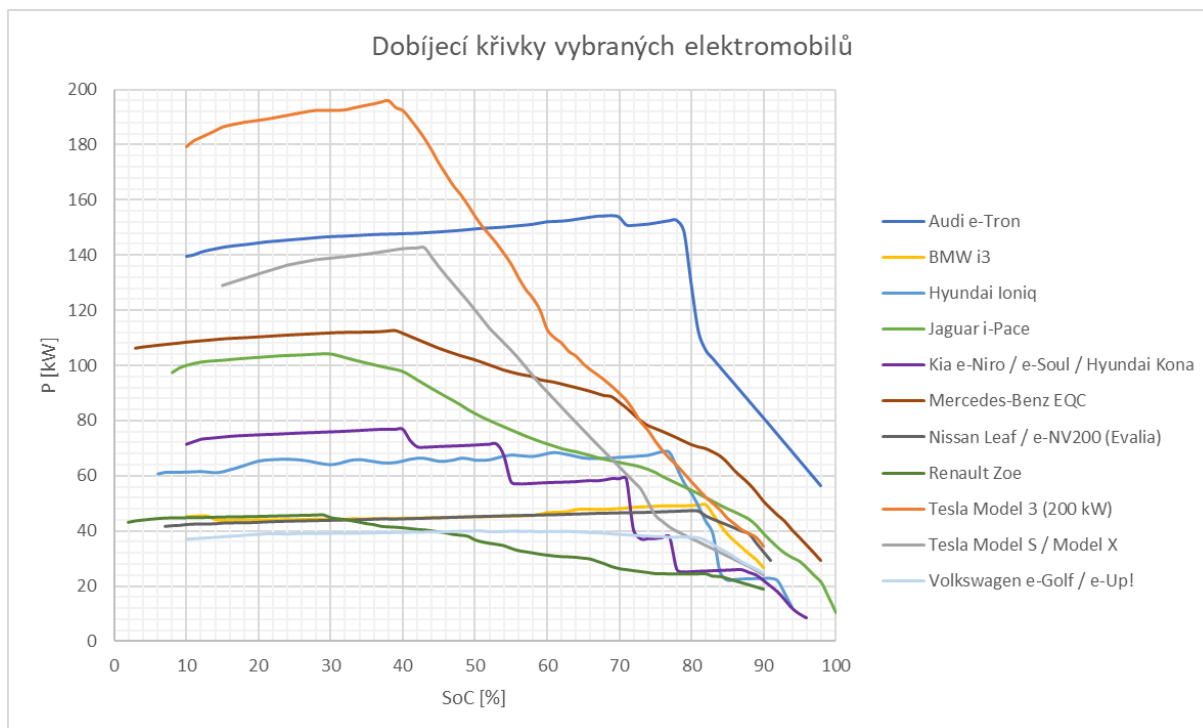
Toto pravděpodobnostní rozložení vychází z hustoty provozu na tranzitních a významných silničních tazích během dne. Předpokládá se, že s rostoucí hustotou provozu se také bude zvyšovat pravděpodobnost potřeby dobíjení EV. Z grafu je patrná ranní a večerní špička požadavku na rychlé veřejné dobíjení. Toto rozdělení pravděpodobnosti jsem interpoloval a převedl na normalizovanou distribuční funkci, pomocí které převádím náhodně generované hodnoty na časy začátku dobíjení, které odpovídají danému pravděpodobnostnímu rozložení.

[19]

## 2.6 Dobíjecí charakteristiky EV

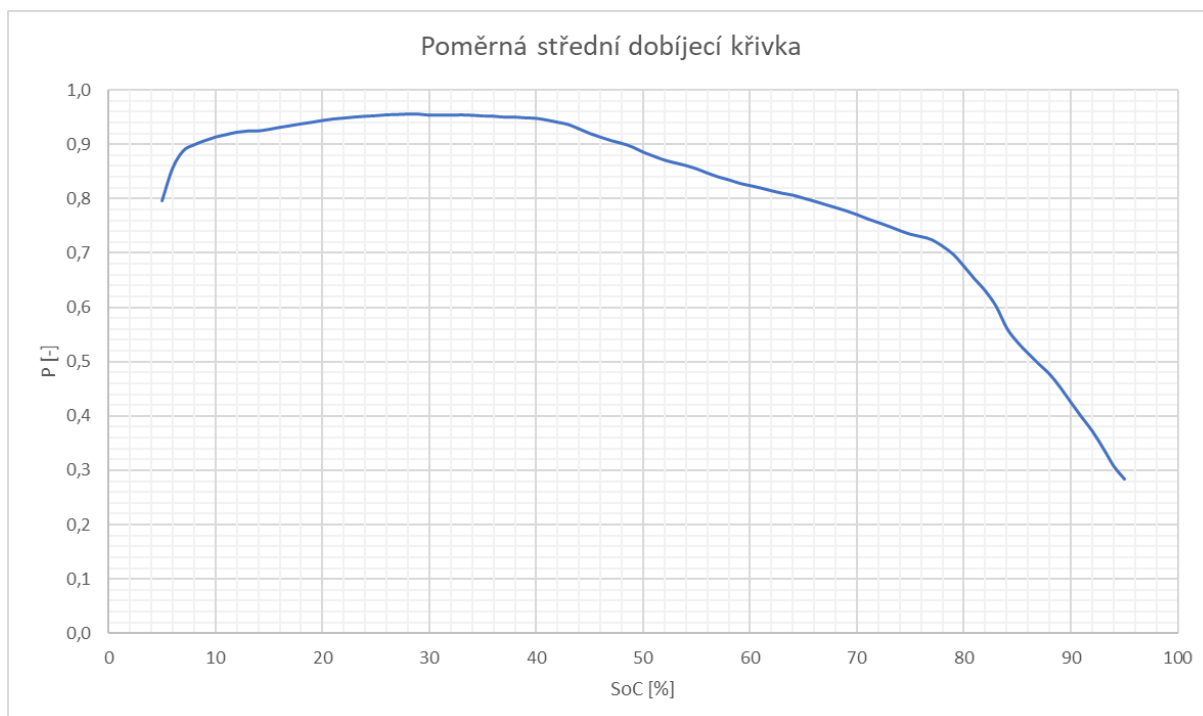
Pro modelování vlastního průběhu dobíjení elektromobilů budu využívat reálné dobíjecí charakteristiky některých elektromobilů. Jedná se o průběh výkonu dobíjení v závislosti na stavu nabití akumulátoru (SoC), viz následující graf.

Bohužel dané charakteristiky nejsou proměřeny v celém rozsahu SoC 0-100 %. Nicméně stejně lze předpokládat, že dobíjení na navrhované rychlodobíjecí stanici nebude probíhat v celém rozmezí 0-100 %. Zvolil jsem si minimální stav nabití, se kterým elektromobil přijede k dobíjecí stanici, 5 % a maximální požadovaný stav nabití 80 %. V tomto intervalu budu náhodně generovat počáteční SoC a konečný SoC. Následně přímo v simulaci bude podle okamžité hodnoty SoC akumulátoru umožněno dobíjení odpovídajícím výkonem.



Obr. 2-10 Dobíjecí křivky vybraných elektromobilů, dle [22]

Pro konkrétní vozidla zobrazena v grafu výše používám jejich reálné dobíjecí charakteristiky, pro ostatní vozidla nebo pro nová budoucí vozidla jsem vytvořil z těchto charakteristik poměrnou střední dobíjecí křivku, kterou poté můžu vynásobit libovolným maximálním výkonem dobíjení.



Obr. 2-11 Poměrná střední dobíjecí křivka

U této charakteristiky si lze povšimnout, že v průměru lze elektromobily nabíjet maximálně výkonem odpovídajícím 95 % udávaného maximálního výkonu, ačkoli některé elektromobily umožňují i mírné překročení maximálního udávaného výkonu. Zhruba od 40 % SoC začne nabíjecí výkon klesat a následně od 80 % již klesá výrazněji více. Vždy samozřejmě závisí na okamžitých podmínkách, při kterých dobíjení probíhá.

[22]

## 2.7 Základní pravidla pro připojení a paralelní provoz vzhledem k DS, měření a vyhodnocování el. energie

### Podmínky připojení a provozu výroben a akumulčních zařízení vzhledem k distribuční soustavě

Při připojení výroby elektrické energie a akumulčního zařízení k distribuční soustavě je nutné se řídit podmínkami zajišťujícími bezpečný a spolehlivý provoz, které jsou uvedeny v Pravidlech provozování distribučních soustav, v příloze 4: Pravidla pro paralelní provoz výroben a akumulčních zařízení se sítí provozovatele distribuční soustavy [36].

Pro sjednocení technických parametrů i požadavků na chování jsou výroby rozděleny podle jmenovitých činných výkonů výrobních modulů do kategorií třídy A až D. Toto rozdělení vychází z Nařízení Komise (EU) 2016/631 – RfG. U výroben elektřiny s akumulčním zařízením se instalované výkony akumulčního zařízení a výroby sčítají, pokud provozovatel distribuční soustavy (PDS) neodsouhlasí technická opatření, která zajistí, že soudobá výroba nepřekročí sjednaný rezervovaný výkon. Pokud by byl součet instalovaného výkonu FVE a výkonu měniče u akumulčního zařízení do 100 kW, spadala by tato výroba do podkategorie A2 (11 kW až 100 kW). Pokud by byl využit měnič s vyšším výkonem, již by bylo nutné uvažovat podkategorii B1 (100 kW včetně až 1 MW). Následující přehled požadavků je zaměřen právě na tyto dvě kategorie, které lze předpokládat u navrhovaného

systemu dobíjecí stanice s fotovoltaickou elektrárnou (FVE) a akumulacním systémem. Zároveň zde budou uvedeny požadavky vztahující se k předpokládanému připojení dobíjecí stanice na hladinu vysokého napětí (vn) 22 kV.

### Měřicí a řídicí zařízení, spínací zařízení, ochrany

Fakturační elektroměry (v majetku PDS) a přiřazené řídicí přístroje musí být umístěny na vhodných a trvale přístupných místech. V případě připojení na hladinu vysokého napětí, do výkonu transformátoru 630 kVA včetně, probíhá měření na straně nízkého napětí a je polopřímé. Od výkonu 630 kVA je měření na straně vysokého napětí a je nepřímé. Přístrojové měřicí transformátory napětí či proudu jsou již součástí zařízení výroby.

Připojení k distribuční soustavě musí být provedeno přes spínací zařízení (vazební spínač) minimálně se schopností vypínání zátěže (např. vypínač, odpínač s pojistkami, úsekový odpínač), kterému je předřazena zkratová ochrana. Toto spínací zařízení může být jak na straně nízkého napětí (nn) (na střídavé straně střídače), tak i na straně vysokého napětí (vn), a musí zajišťovat galvanické oddělení ve všech fázích. Samozřejmě je nutné osadit také ochrany (např. zkratovou ochranu, ochranu proti přetížení, ochranu před nebezpečným dotykem). Nastavení ochran zobrazuje následující tabulka. Nastavení se vztahují ke sdruženému napětí. Časy vypnutí obsahují součet časového nastavení a vlastních časů spínačů a ochran.

Tab. 2-11 Ochrany rozpadového místa výroben s moduly (VM (A2), B1, B2, C) [36]

funkce	Rozsah nastavení	Doporučené nastavení ochrany	
Nadpětí 3. Stupeň U >>	1,00 – 1,30 Un	1,25 Un	0,1 s
Nadpětí 2. stupeň U >>	1,00 – 1,30 Un	1,2 Un	nezpožděně (5s) <sup>(4)</sup>
Nadpětí 1. stupeň U >	1,00 – 1,30 Un	1,15 Un <sup>(1)</sup>	≤ 60 s
Podpětí 1. stupeň U <	0,10 – 1,00 Un	0,7 Un	0 – 2,7 s <sup>1)</sup>
Podpětí 2. stupeň U <<	0,10 – 1,00 Un	0,3 Un (0,45 Un) <sup>(2)</sup>	≥ 0,15 s
nadfrekvence f >	50 – 52 Hz	51,5 Hz	≤ 100 ms
podfrekvence f <	47,5 – 50 Hz	47,5 Hz <sup>(4)</sup>	≤ 100 ms
Jalový výkon/ podpětí (Q• & U<)	0,70 – 1,00 Un	0,85 Un	t1 = 0,5 s

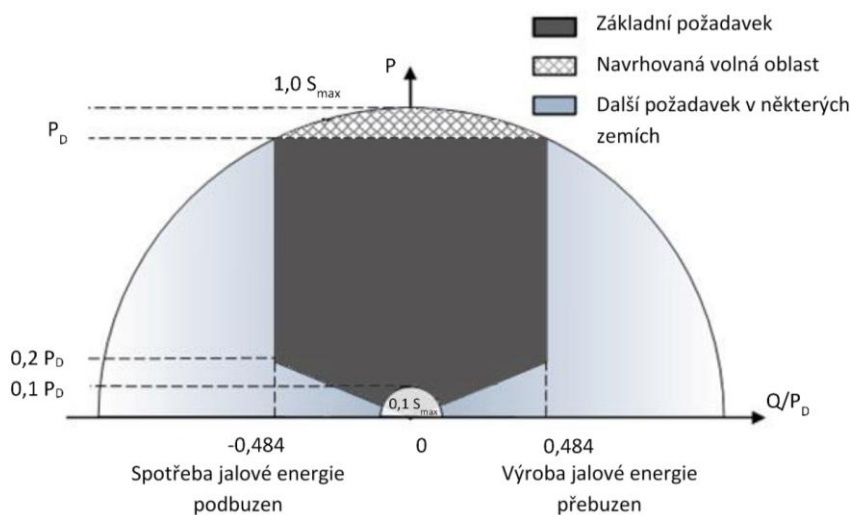
- (1) Pro 1. stupeň nadpětí se použijí 10-minutové hodnoty odpovídající ČSN EN 50160. Výpočet 10-minutové hodnoty musí odpovídat 10 minutové agregaci podle ČSN EN 61000-4-30, třída S. Tato funkce musí být založena na průměrné efektivní hodnotě napětí v intervalu 10 minut. Odchylka od ČSN EN 61000-4-30 spočívá v klouzavém měřicím okně. Pro porovnání s vypínací mezí postací výpočet nové 10-minutové hodnoty nejméně každé 3 s.
- (2) Tento napěťový stupeň vyvolá rychlé odpojení od sítě při blízkých zkratech. Nastavení 0,3 Un se volí pro výrobní připojené do sítě 110 kV a napětí měřené na straně vn (odpovídá mu cca 15 % Un v přípojném bodě. Nastavení 0,45 Un se volí pro výrobní připojené do sítě vn a při měření napětí na straně nižšího napětí.
- (3) Toto nastavení je závislé na výkonu výroby a knižetově závislém přizpůsobení výkonu.

## Dálkové řízení a výměna dat

Výrobní elektrárny kategorie A2 i B1 musí být vybaveny logickým rozhraním, které umožní dálkové řízení a výměnu dat s provozovatelem distribuční soustavy. Pomocí řídicího signálu musí být umožněno do 5 s od obdržení pokynu (HDO, RTU) přerušit dodávku činného výkonu na výstupu. Odpínací prvek, který zajistí dálkové odpojení musí být připojen na stálé napájení, aby zajistil automatizaci procesu i po silovém odpojení výrobní z paralelního provozu s distribuční soustavou. Dále musí být pomocí tohoto rozhraní umožněno dálkové omezení dodávaného činného výkonu, řízení jalového výkonu a napětí a přenos dat. Pro výrobní moduly A2 v současné době postačuje pouze příprava potřebného rozhraní.

## Podpora sítě

Výrobní se taktéž musí automaticky podílet na udržování napětí při dodávce do sítě. Detailní parametry jsou stanoveny PDS ve smlouvě o připojení. Pokud PDS tento požadavek uplatní a vyžadují to podmínky v síti, musí se výrobní zařízení na statickém udržování napětí podílet pomocí jalového výkonu v rozsahu účinníku mezi hodnotami 0,90 kapacitní a 0,90 induktivní. Řízení jalového výkonu mimo uvedený rozsah účinníku může být s výrobcem dohodnuto v rámci poskytování podpůrné služby PDS. Následující obrázek graficky znázorňuje minimální i nepovinné požadavky dodávky, nebo odběru jalového výkonu při jmenovitém napětí výrobní připojené do sítě vn.  $P_D$  odpovídá návrhovému výkonu výrobní.



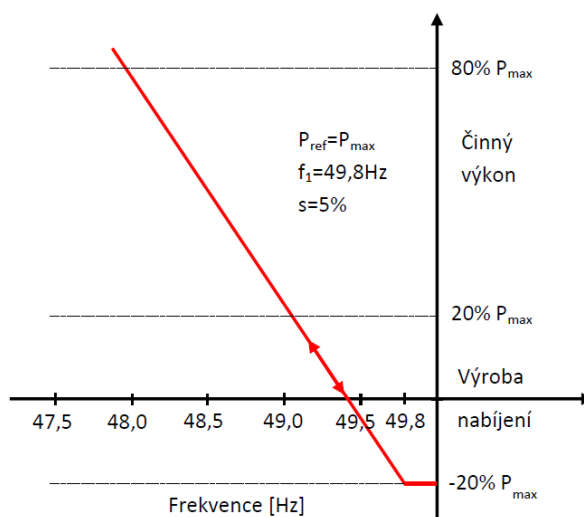
Obr. 2-12 Požadavky na dodávku nebo odběr jalového výkonu při  $U_n$  [36]

## Přizpůsobení činného výkonu

Výrobní i akumulární zařízení připojené do distribuční soustavy musí být schopné automaticky snižovat činný výkon v závislosti na frekvenci v síti a podle poměrů v síti i dle povelů z řídicího dispečinku provozovatele distribuční soustavy nebo se automaticky odpojit. Snižování činného výkonu při nadfrekvenci musí být aktivováno pro prahovou hodnotu frekvence 50,2 Hz a při nastavené státní (s) 5 %.

Elektrické akumulární zařízení při nabíjení i v režimu dodávky musí být taktéž schopné aktivace odezvy činného výkonu na podfrekvenci. Tuto odezvu musí poskytovat při mezi frekvence 49,8 Hz a při státní 5 %. Rychlost reakce musí být tak rychlá, jak je to technicky možné s vlastním zpožděním do 2 s a odezvou maximálně 30 s. Přídavné zpoždění musí být programovatelné k nastavení zpoždění

na hodnotu mezi vnitřním zpožděním a 2 s. Po aktivaci se musí používat aktuální hodnota frekvence a reagovat na její vzrůst nebo snížení podle naprogramované statiky s přesností  $\pm 10\%$  jmenovitého výkonu.



Obr. 2-13 Frekvenční odezva činného výkonu na podfrekvenci u akumulčního zařízení [36]

Snížení dodávaného výkonu na hodnotu požadovanou PDS v přípojném bodě sítě (např. na 60, 30 a 0 % instalovaného výkonu) musí být okamžité, nejpozději do 5 s po obdržení pokynu, s dobou pro dosažení žádané hodnoty do 1 minuty. Výrobní moduly musí být schopny zvyšovat výkon gradientem alespoň 2 % instalovaného výkonu ( $P_n$ ) za minutu, ale ne rychleji než 40 %  $P_n$  za minutu, obdobně pro snižování výkonu.

### Řízení jalového výkonu

Jalový výkon výroby musí být od instalovaného výkonu 100 kVA říditelný. Při dodávce činného výkonu je nastavení jalového výkonu zadáváno buď pevnou hodnotou, nebo dálkově nastavitelnou žádanou hodnotou. Žádaná hodnota je buď:

- Pevná hodnota jalového výkonu Q fix
- Hodnota jalového výkonu závislá na napětí Q (U)
- Hodnota jalového výkonu závislá na činném výkonu Q (P)
- Pevná hodnota účinníku Cos  $\varphi$  fix
- Hodnota účinníku závislá na napětí Cos  $\varphi$  (U)
- Hodnota účinníku závislá na činném výkonu Cos  $\varphi$  (P)
- Zadaná hodnota napětí

### Automatické opětovné připojení

Výrobní moduly odpojené od sítě z důvodu odchylky napětí či frekvence mohou být opětovně automaticky připojeny, pokud napětí a frekvence jsou po dobu 300 s (5 min) ve stanovených mezích (85-110 % jmenovité hodnoty napětí a frekvence 47,5-50,05 Hz) a výrobní umožňuje postupné najetí výkonu od nuly s gradientem maximálně 10 % jmenovitého výkonu za minutu.

## **Zvýšení napětí**

Zvýšení napětí vyvolané provozem připojených výroben nesmí za normálních provozních podmínek v přípojném bodu překročit 2 %.

## **Zpětné vlivy na napájecí síť**

Pro omezení rušení ostatních zařízení, je zapotřebí omezit zpětné vlivy výroby (především změny napětí a harmonické). Bez kontroly zpětných vlivů mohou být výroby připojeny, pokud poměr zkratového výkonu sítě ke jmenovitému výkonu celého zařízení je větší než 500.

[36]

## **Doplňující konkretizované připojovací podmínky dle ČEZ Distribuce**

Dle připojovacích podmínek společnosti ČEZ Distribuce probíhá primární měření (měření na straně vyššího napětí transformátoru) vždy v případě připojení více transformátorů nebo při instalaci jednoho transformátoru obvykle o příkonu 400 kVA a výše. Sekundární měření (na straně nižšího napětí) lze využít při připojení jednoho transformátoru do maximálního příkonu 1 000 kVA včetně, když nelze použít primární měření. U zákazníků kategorie B a u výrobců se měření zajišťuje vždy s použitím měřicích transformátorů proudu (MTP) a při primárním měření taktéž s měřicími transformátory napětí (MTN). Pro měření v napěťové hladině vysokého napětí se používají dvousystémové třívodičové elektroměry.

[38]

U výroben s výkonem do 30 kW není požadována dálková regulace ani dálkové vypínání z dispečinku provozovatele distribuční soustavy.

U výroben s výkonem v rozmezí 30 kW a 100 kW není požadován přenos měření a signalizace na dispečink PDS. Výroby musí být schopny úrovněového řízení činného výkonu pomocí relé přijímače HDO (nebo jednotky RTU). Regulace musí probíhat ve všech třech fázích současně, v úrovních 0 % a 100 % jmenovitého výkonu. Dálkově lze na nezbytně nutnou dobu plně zamezit dodávce výkonu do sítě.

Výroby s výkonem 100 kW a vyšším musí být schopny víceúrovňového řízení činného výkonu (pomocí HDO nebo RTU). Přejídně může být dálkově omezen maximální dodávaný výkon výroby na stanovenou úroveň (0, 30, 60 a 100 % jmenovitého výkonu pro FVE), která nesmí být překročena, ale výroba může být dále provozována s nižším výkonem nebo lze výkon omezit až na nulu. Z výroben tohoto výkonu musí být na dispečink PDS zajištěn přenos měření a signalizace. Při připojení do sítě vysokého napětí musí tyto výroby umožňovat také plynulou regulaci jalového výkonu (regulace U/Q). Rozsah jalového výkonu je stanoven a musí být využitelný v průběhu několika minut a libovolně často dle pokynů dispečinku PDS nebo systémové automatické regulace.

Pro výroby obecně platí, že pokud nebude s výrobcem uzavřena smlouva o výkupu, pro zabránění neoprávněné dodávky přebytků do sítě je nutné vybavit výrobu zpětným wattovým relé (nebo ochranou s podobnou funkcí). Dodávka a odběr při využívání hlavního jističe s hodnotou nad 80 A musí být měřeny nepřímým měřením, přes měřicí transformátor proudu.

[39]

### **Připojení elektromobilů a dobíjecích stanic**

Požadavkům pro připojení elektromobilů a dobíjecích stanic k distribuční soustavě se věnuje část textu PPDS přílohy 6: Standardy připojení zařízení k distribuční soustavě [37].

Pro zajištění bezpečné dodávky elektřiny a dodržení jejích kvalitativních parametrů je nezbytným předpokladem monitorování a případné řízení výkonu dobíjecích stanic připojených do distribuční soustavy. Jsou stanoveny tři kategorie dobíjecích stanic s určitými požadavky. Kategorie DoS1 (výkon do 3,7 kW na fázi, pro dobíjení jednostopých elektrických vozidel) mohou být připojeny bez ohlašovací povinnosti, za případné překročení rezervovaného příkonu zodpovídá zákazník. Kategorie DoS2 (výkon do 22 kW včetně, s výjimkou DoS1, které nejsou veřejně přístupné) zahrnuje povinnost podat u PDS žádost o připojení k DS a uzavřít smlouvu o připojení, která stanovuje mimo jiné rezervovaný příkon, limity zpětných vlivů na DS a zajištění komunikačního rozhraní pro sledování a/nebo řízení dobíjení. Oproti předchozí kategorii je v případě třetí kategorie DoS3 (výkon nad 22 kW) navíc nutné u dobíjecí stanice s více body a lokálním řídicím systémem zajistit komunikační rozhraní mezi místním řídicím systémem a řídicím systémem PDS pro sledování a/nebo řízení celkového odběru.

[37]

### **Podíl na oprávněných nákladech spojených s připojením k distribuční soustavě**

Pro připojení k distribuční soustavě je nutné zažádat. Provozovatel distribuční soustavy posoudí možnost připojení s ohledem na místo a způsob připojení, velikost požadovaného rezervovaného příkonu nebo výkonu a časový průběh zatížení, spolehlivost dodávky, charakter zpětného působení zařízení na distribuční soustavu a další vlivy.

Při připojení k distribuční soustavě hradí žadatel o připojení podíl na oprávněných nákladech daných připojením a zajištěním požadovaného příkonu nebo výkonu. V těchto nákladech mohou být zahrnuty pouze nezbytně nutné vynaložené náklady související s pořízením, výstavbou nebo úpravou distribuční soustavy v daném místě připojení, v návaznosti na požadovaný příkon nebo výkon. Úhrada podílu se určí jako součin požadovaného rezervovaného příkonu nebo výkonu a měrného podílu uvedeného ve vyhlášce č. 16/2016 Sb., o podmínkách připojení k elektrizační soustavě [40]. Pro standardní připojení za rezervaci příkonu na hladině vysokého napětí činí podíl žadatele 800 000 Kč/MW. Jestliže by se žadatel připojoval přímo do rozvodny provozovatele distribuční soustavy a nebyla by při tom nutná výstavba nové kobky a přípojnic jednalo by se o připojení typu B1 s měrnými náklady 200 000 Kč/MW. Za rezervaci výkonu na hladině VN je měrný podíl žadatele 640 000 Kč/MW v případě připojení typu A nebo 150 000 Kč/MW pro připojení typu B. Jestliže provozoval distribuční soustavy rozšíří distribuční soustavu do předávacího místa, např. trafostanice nebo rozvodny žadatele o připojení, jedná se o typ připojení A. Typ B je takový, který nesplňuje podmínky typu A.

V případě současného požadavku na rezervaci příkonu i výkonu se hradí vždy vyšší částka z vypočtených hodnot dle požadovaného příkonu a výkonu. Při změně připojení se stanoví podíl, který odpovídá stávajícím hodnotám (vyšší z hodnot příkonu nebo výkonu), a podíl odpovídající požadovaným hodnotám (vyšší z hodnot). Pokud je podíl odpovídající stávajícím hodnotám nižší než podíl pro požadované hodnoty, platí se částka odpovídající rozdílu hodnot. Pokud je podíl stávajících hodnot vyšší, neplatí žadatel žádný podíl na nákladech.

[40]



### **Měření, vyhodnocování a platby za odebranou nebo dodanou elektrickou energii**

Pro účely organizace trhu s elektřinou se zákazníci dělí do čtyř kategorií (A, B, C, D). Uvažovaná dobíjecí stanice by spadala do kategorie odběratele B, která je určena pro odběratele, kteří jsou připojeni k distribuční soustavě s mezifázovým napětím od 1 kV do 52 kV.

[41]

V případě připojení k distribuční soustavě s napětím od 1 kV do 52 kV včetně a s rezervovaným příkonem nad 250 kW je nutné měření elektřiny typu A. Pokud by byl rezervovaný příkon do 250 kW, postačovalo by měření typu B (může být i typu A). Měření typu A se vyznačuje průběhovým měřením s dálkovým denním přenosem údajů a průběžným záznamem střední hodnoty činného a jalového výkonu za měřicí interval, který provádí přímo měřicí zařízení. Měření typu B na rozdíl od typu A umožňuje dálkový přenos údajů s intervalem jiným než denním. Základní měřicí interval u měření typu A i B je jedna čtvrt hodina. U první čtvrt hodiny je stanoven začátek na čas 00:00:00 a konec na čas 00:15:00. Základní vyhodnocovací interval je 1 hodina. U první hodiny je stanoven začátek na čas 00:00:00 a konec na čas 01:00:00 kalendářního dne. Základní interval u měření typu A pro zpracování a přenos údajů z měřicího zařízení je 1 kalendářní den. U měřicího zařízení typu B je to 1 měsíc. U měření typu A i B se měří odebíraná i dodávaná jalová elektřina. Směr toku elektřiny do odběrného místa je považován za kladný, směr toku elektřiny z odběrného místa za záporný.

Měření může být přímé, při kterém veškerá měřená elektřina prochází elektroměrem, nebo nepřímé, kdy jsou použity měřicí transformátory proudu a případně i měřicí transformátory napětí. Měření může být na primární nebo sekundární straně transformátoru.

[42]

Platba za odběr elektřiny z distribuční soustavy se skládá z několika položek. Kromě platby za vlastní odebranou silovou elektřinu, se mimo jiné také platí za smluvně domluvenou rezervovanou kapacitu za stanovený časový interval. Tento interval je stanoven na 15 minut. Interval je zvolen z důvodu, aby se předcházelo odběru elektrické energie s velkými špičkami výkonu, které by měly nepříznivý vliv na kvalitu elektrické energie a na stabilitu provozu distribuční sítě. Jelikož z provozních a technických důvodů není možné rychle měnit výkon ve velkém rozsahu a zároveň s ohledem na technickou proveditelnost měření, byla pro vyhodnocování zvolena právě čtvrt hodina. Průměrný čtvrt hodinový elektrický příkon odběratele tedy musí být nižší než domluvená rezervovaná kapacita, jinak je nutné zaplatit navíc penalizační poplatek za překročení rezervovaného příkonu. Čtvrt hodinové maximum příkonu nebo výkonu se měří nepřetržitě 24 hodin denně. Fakturační období je jeden měsíc. Lze si sjednat roční rezervovanou kapacitu i měsíční rezervovanou kapacitu (společně nebo zvlášť) s cenou vždy za měsíc. Roční rezervovaná kapacita je pro každý kalendářní měsíc shodná, měsíční rezervovaná kapacita může být domluvena pro každý měsíc odlišně. Měsíční rezervovaná kapacita je vhodná pro odběry s nestálou (sezónní) hodnotou příkonu, ale není výhodná z důvodu vyšší ceny za plnou náhradu roční rezervované kapacity s podobným požadavkem na velikost příkonu. Obdobně to platí i v případě výroben, kde je domluven rezervovaný výkon. Ze změřených čtvrt hodinových hodnot během jednoho měsíce se vezme nejvyšší hodnota, od které se odvíjí výsledná fakturační cena.

Místo měsíční platby za rezervovanou kapacitu a platby za použití sítí provozovatele distribuční soustavy lze sjednat jednosložkovou cenu za službu sítí provozovatele distribuční soustavy. Tato zjednodušená platba (v Kč za MWh) je vhodná pro odběratele, kteří potřebují odebírat vysoký výkon, ale pouze výjimečně a po krátkou dobu. Výhodnost se projevuje přibližně do 300 hodin doby využití maxima.

Další položku tvoří platba za překročení účinníku. Povolенý účinník je v rozmezí 0,95-1 induktivního charakteru. Pokud je za periodu (1 měsíc) průměrný účinník nižší než 0,95, v pěti úrovních jsou odstupňované procentní přírážky, které určují finanční sankci. Nevyžádaná dodávka jalové energie do sítě se také vyhodnocuje a je postihována zvlášť (Kč za MVARh).

Celková platba za elektřinu ještě obsahuje platbu za systémové služby, za činnost operátory trhu, na podporu elektřiny z podporovaných zdrojů energie a daň z elektřiny.

[43], [44]

V současné době není v distribuční soustavě shodná metodika ve vyhodnocování a následných platbách za činné a jalové výkony odběrů (dodávek). Činné výkony jsou vyhodnocovány na bázi čtvrt hodinového intervalu, zatímco jalové výkony jsou vyhodnocovány za celý měsíc. Účinník se následně počítá z poměru celkové odebrané jalové a činné energie za každý celý měsíc (zúčtovací perioda). Tato metodika průměrování účinníku vede ke snižování až přehlížení případných problémů s jalovým výkonem a může negativně ovlivňovat kvalitu dodávané energie, která je vyhodnocována v intervalech 10 minut.

Chystaná opatření již počítají se sjednocením a s upřesněním měření jalových výkonů a účinníku. Nově by se tak měly měřit s periodou 15 minut a vyhodnocování by mělo probíhat konzistentně s činným výkonem (rezervace nebo platba za odebranou nebo dodanou energii). Místo přírážky za nedodržení účinníku by se měly uplatnit konkrétní tarify za jalovou energii v Kč za MVARh Sjednocení intervalu měření by mělo postupně nastat v rámci celé elektrizační soustavy (včetně měření a zúčtování odchylek v přenosové soustavě). Do budoucna se počítá se zavedením měření jalové energie u odběrných míst i na hladině nízkého napětí s využitím inteligentního měření (AMM).

[45]

### 3 Dobíjecí stanice s akumulací a fotovoltaickou elektrárnou společnosti PRE



Obr. 3-1 Nabíjecí stanice společnosti PRE v pražských Holešovicích (zdroj: fotoarchiv autora)

#### 3.1 Základní popis

Pražská energetika, a.s. (PRE) zpřístupnila od 1. 2. 2018 veřejnosti unikátní rychlonabíjecí stanici pro elektromobily, která je doplněna obnovitelným zdrojem elektrické energie a ukládáním elektřiny do akumulátorů. Jedná se o první pilotní projekt v České republice, jehož cílem je ověřit funkčnost a výhodnost této kombinace zařízení, která by měla přispět k rozvoji infrastruktury dobíjecích stanic a zároveň ke stabilitě energetické sítě v daném místě. Tato dobíjecí stanice se nachází v Holešovicích v Praze. Tato lokalita byla vybrána z důvodu parametrů distribuční sítě, volného prostoru pro stavbu a předpokládané vysoké návštěvnosti z důvodu nedalekého Výstaviště Praha, Sportovní haly a parku Stromovka. V následujících letech bude docházet v souvislosti s rozvojem elektromobility k stále významnějšímu zatěžování distribuční soustavy, a to hlavně ve velkých městech, kde bude nutná vyšší koncentrace dobíjecích stanic. Zde může docházet k zhoršování parametrů spolehlivosti a kvality dodávek elektrické energie. K eliminaci dopadů dobíjecí stanice na síť jsou využity akumulátory, které umožňují v případě nabíjení elektromobilu poskytnout část výkonu a tím dojde ke snížení aktuálního zatížení v distribuční síti. Navíc řídicí jednotka stanice sleduje průběh napětí v soustavě a v případě hrozícího přepětí odebírá část energie pro dobíjení bateriového uložení. Naopak v případě, že by hrozilo podpětí, dodává energii zpětně do sítě. V některých oblastech by ani z hlediska dostupného výkonu přípojky nemohly být rychlonabíjecí stanice instalovány. Aby nemuselo docházet k časově

zdlouhavému, hlavně z hlediska povolení, a finančně nákladnému posilování kabeláže přípojky, je možné v těchto místech instalovat společně s rychlobíjejí stanicí akumulární zařízení. Tím se ušetří značné stavební práce spojené s výměnou napájecího kabelu a celý proces bude rychlejší a jednodušší.

Tato dobíjejí stanice umožňuje současné nabíjení čtyř elektromobilů, díky dvěma nabíjejí stojanům. Dvěma v režimu rychlonabíjení (DC) a dalším dvěma středně rychle (AC). Současně může být připojen i např. elektroskútr nebo elektrokolo. Rychlonabíjejí stanice má výkon až 150 kW pro stejnosměrné nabíjení pomocí konektoru CCS Combo 2 a až 50 kW pomocí druhého dobíjejího bodu CCS Combo 2 nebo CHAdeMO. Standardní střídavá nabíjejí stanice má výkon dvakrát 22 kW a elektromobily lze napájet pomocí konektoru Mennekes Typ 2.

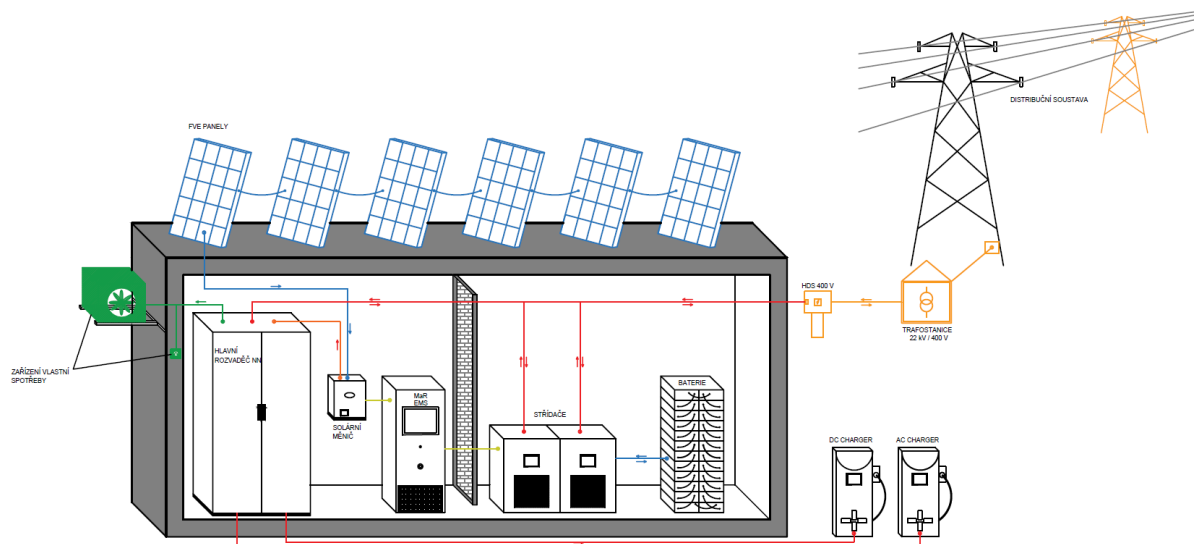
Z hlediska výhodnosti využívání elektromobilů oproti vozům se spalovacími motory, je vhodné využívat bezemisní obnovitelné zdroje elektrické energie, aby nedocházelo pouze k přesouvání emisí na jiné místo, ale aby skutečně docházelo k jejich snížení. Na střeše objektu, který může připomínat klasickou čerpací stanicí pohonných hmot, se nachází celkem 30 fotovoltaických modulů. Jejich celkový instalovaný výkon je 7,35 kWp. Vyrobená elektrická energie z modulů může proudit jak do nabíjejích stanic, tak do akumulátorového uložení umístěného v objektu. Je zde použit Li-ion akumulátor ( $\text{LiFePO}_4$ ) s výkonem nabíjení nebo vybíjení 60 kW. Jeho využitelná kapacita je 87 kWh (celková kapacita 108 kWh).

Během prvních čtyř měsíců veřejného provozu proběhly stovky dobíjení elektromobilů. V naprosté většině případů zde probíhá rychlonabíjení, nejčastěji po dobu 10 minut. Méně než jedna čtvrtina řidičů, zde strávila dobu delší než půl hodiny. Standardní nabíjení na AC stojanu je využíváno v průměru okolo jedné hodiny. Stanice bývá nejvíce vytížena kolem šesté hodiny večer. Za celý rok 2018 dodala tato dobíjejí stanice do elektromobilů přes 15 MWh elektrické energie.

Z měření napětí vyplývá, že v místě umístění stanice dochází navečer ke změnám napětí přibližně o 6 V (bez vlivu nabíjejí stanice). Právě tyto odchylky napětí je schopen akumulátor v kombinaci se střídačím efektivně kompenzovat. Takovýchto míst se může v centru měst nacházet několik a v případě rozvoje elektromobility by mohlo docházet k překračování normou dovolených odchylek napětí. K omezení tohoto případu by mohlo být využívání daného systému jedním z řešení. Vlivem rychlonabíjení elektromobilů může napětí v síti klesnout i o 5-7 V. Pro omezení poklesu napětí není nutné odebírat celý výkon z akumulátorového uložení, ale postačuje za určitých podmínek účinník i 15 kW. Z tohoto důvodu jsou dostačující relativně malá uložení. K regulaci napětí v distribuční soustavě jsou využívány dva střídače o celkovém výkonu 66 kW, což odpovídá přibližně pětině výkonu distribučního transformátoru v místě připojení. Při běžném provozu se akumulátor nenabíjí na plnou využitelnou kapacitu pro případ, že by bylo v DS přepětí a k normalizaci napětí by bylo potřeba odebírat výkon ze sítě. Hladiny využívání akumulátoru lze nastavit v řídicím systému. Ten automaticky monitoruje aktuální stav napětí v síti a v případě překročení nastavených mezí zareaguje připojením akumulátoru. Dále řídicí systém umožňuje v oblasti, kde je připojen, kompenzovat jalovou energii. Díky využití akumulátoru lze docílit udržování účinníku  $\cos \varphi$  okolo 1 a tím minimalizovat negativní vlivy způsobené jalovou energií. V případě, že by docházelo ke zhoršování účinníku systém zjistí, zda se jedná o kapacitní nebo induktivní charakter a podle toho měnič vyrobí složku opačného charakteru a tím provede kompenzaci. Celkem jsou aktuálně k dispozici čtyři režimy funkce. Prvním je již zmíněná kompenzace distribuční soustavy podle napětí (nabíjení akumulátoru při přepětí a vybíjení při podpětí), druhým režimem je kompenzace nabíjení (funkce je stejná jako předchozí případ, ale je aktivní pouze v případě, že podpětí je způsobeno dobíjením elektromobilu), třetí režim omezuje oděr ze sítě (nastavení maximální velikosti odebíraného proudu z distribuční soustavy, při vyšším odběru nad touto hranicí poskytuje potřebnou energii akumulátor) a poslední čtvrtý režim je testovací (manuální aktivování nabíjení nebo vybíjení, lze nastavit hodnoty činného nebo jalového výkonu, čas náběhu nabíjejí nebo vybíjejí rampy).

Akumulátor by tak mohl pomoci s vykrýváním denních výkonových špiček v dané DS. K tomu je zapotřebí spíše krátkodobý větší výkon a není nutná příliš velká kapacita akumulátoru. Pro krátké vykrývání špiček (v řádu minut, maximálně desítek minut) je aktuální kapacita akumulátoru dostačující, pro delší časy by bylo zapotřebí vyšší kapacity. Díky velmi rychlé automatizované reakci systému, regulátor DS získá více času na další řešení problému.

Na následujícím obrázku je znázorněno uspořádání a propojení zařízení této dobíjecí stanice.



Obr. 3-2 Schéma nabíjecí stanice [2]

[1], [2]

## 3.2 Popis hlavních komponent systému

### Akumulátorové uložení

V původním projektu bylo počítáno s olověnými akumulátory s napětím 48 V. Mimo jiné díky klesající ceně Li-ion akumulátorů došlo ke změně projektu. V dobíjecí stanici je tedy instalován vysokonapěťový Li-ion akumulátor od výrobce Pylontech. Konkrétní použitá technologie je lithium-železo fosfát ( $\text{LiFePO}_4$ ), která se vyznačuje vyšší odolností a tím i delší životností, menším rozměrovým provedením při zachování stejné kapacity, vyšší bezpečností (nehrozí vzplanutí), jednodušší instalací a následným provozem. Využitím tohoto typu akumulátoru vznikl v objektu volný prostor, který se může v budoucnu využít pro rozšíření bateriového uložení. Akumulační systém má garantovanou životnost 10 let, během nichž zvládne zhruba 4 000 plných nabíjecích a vybíjecích cyklů. Využívaná kapacita akumulátoru je 80 kWh, při dodávaném plném výkonu se vybije za hodinu a dvacet minut. Při provozu během prvního půl roku však během dne neproběhla v průměru ani půlka cyklu. Akumulátorový systém je od výrobce osazen tzv. „battery management systémem“ (BMS), který pracuje zcela autonomně. Řídicímu systému může předávat informace o dovozených nabíjecích nebo vybíjecích proudech. Tzv. „balancery“ hlídají rovnoměrnost rozložení napětí, proudu a teploty na jednotlivých článcích, čímž vyvažují nabíjení a vybíjení jednotlivých článků a tím se prodlužuje životnost celého systému. V případě překročení kritické hodnoty napětí BMS vypne celý akumulátor, aby nedošlo k jeho poškození. Díky modulárnímu uspořádání lze jednotlivé moduly spojovat do série, čímž lze upravit výkon a napětí podle požadavků. Spojením akumulátorů paralelně, se zvýší kapacita a výkon celého systému. V případě paralelního spojení by bylo nutné systém doplnit o další modul, řídicí jednotku třetího stupně (MBMS). Vlastní akumulátorový systém má pasivní chlazení, které se projevuje menší spotřebou el. energie a je tiché.

Pro lithiové akumulátory je neoptimálnější provozní teplota ( $23 \pm 5$ ) °C. Vyšší teplota snižuje životnost, ale nemá vliv na výkon. Pokles teploty pod 15 °C má ale zásadní vliv v podobě snížení využitelné kapacity i výkonu. Z tohoto důvodu je nutné udržovat v technickém zázemí nabíjecí stanice konstantní teplotu pomocí vytápění nebo chlazení tepelným čerpadlem.

[2] , [3]

Na následujícím obrázku je pro představu vyobrazen použitý akumulátorový systém, složený z jednotlivých modulů.



Obr. 3-3 Akumulátorový systém PowerCube-M1 [3]

V následující tabulce jsou přehledově zaznamenány jednotlivé parametry akumulátorového systému PowerCube-M1, který se skládá z 23 ks akumulátorových modulů a jedné řídicí jednotky.

Tab. 3-1 Parametry akumulátorového systému [4]

Akumulátorový systém PowerCube-M1 (736V148AH), Pylon Technologies	
Celková kapacita	108,9 kWh, 148 Ah
Jmenovité napětí	736 Vdc
Provozní napětí	690-828 Vdc
Nabíjecí/vybíjecí proud jmenovitý	74 A
Nabíjecí/vybíjecí proud maximální	148 A
Hloubka vybití (DoD)	80 % (10-90 %)
Účinnost	96 %
Počet akumulátorových modulů	23 ks (4,74 kWh, 148 Ah, 32 V)
Životnost	10+ let
Počet provozních cyklů	3 500
Provozní teplota	10 °C až 40 °C
Krytí	IP 20
Vlastní spotřeba řídicí jednotky	8 W
Rozměry (Š x V x H)	(815 x 2 130 x 659) mm
Hmotnost	1 250 Kg

## **Akumulátorový měnič**

K akumulátorovému systému jsou připojeny dva invertory od firmy Socomec, typu Sunsys PCS<sup>2</sup>-66TR, které v případě nabíjení akumulátoru převádí střídavé průběhy napětí a proudů na stejnosměrné a v případě dodávky elektrické energie směrem z akumulátoru naopak stejnosměrné na střídavé průběhy. Na střídavé straně jsou připojeny třífázově a zatížení jednotlivých fází je řízeno tak, aby bylo symetrické. Jejich aktuální provozní režim je nastavován z nadřazeného řídicího systému pomocí PLC. Výkon každého z nich je 66,6 kVA. Jeden z inverterů se využívá pro kompenzaci činného výkonu a druhý pro kompenzaci jalového výkonu. Nicméně pro současnou dodávku činného i jalového výkonu by postačoval jen jeden inverter. V případě výpadku napětí v síti dojde k odpojení střídačů, provoz dobíjecí stanice v ostrovním režimu není povolen.

[5]

## **Fotovoltaická elektrárna**

Její hlavní smyslem je snížení provozních nákladů v podobě pokrytí vlastní spotřeby nabíjecí stanice způsobené vytápěním, nebo chlazením. To je nutné z důvodu udržování konstantní teploty kvůli akumulátoru. Vyrobené přebytky elektrické energie mohou být ukládány do akumulátoru nebo dodávány přímo do distribuční sítě. Na střeše nabíjecí stanice, je osazeno celkem 30 fotovoltaických modulů typu IBC PolySol 245 DS, rozdělených do šesti řad. Špičkový výkon jednoho modulu je 245 kWp. Celkový špičkový výkon elektrárny je 7,35 kWp. Moduly jsou spojeny do dvou řetězců. Orientace modulů je směrem na jihozápad se sklonem od zemské roviny 15 °.

[5]

## **Fotovoltaický střídač**

Stejnoseměrný proud a napětí generované fotovoltaickou elektrárnou jsou hned převedeny na střídavé průběhy pomocí třífázového fotovoltaického střídače Fronius Symo 7.0-3-M. Ten obsahuje dva sledovače bodu maximálního výkonu (MPP tracker), které fungují zvláště pro každý řetězec fotovoltaických modulů. Maximální výstupní výkon střídače je 7 kW a maximální účinnost 98 %. Ze střídače je výkon veden do hlavního rozvaděče s jištěním 3x20 A. V okamžiku, kdy by došlo k výpadku napájení, odpojí se fotovoltaický střídač, a tím se zamezí ostrovnímu provozu fotovoltaické elektrárny.

[5]

## **Řídicí a dohledový systém**

Pro měření elektrických i neelektrických veličin, které jsou mimo jiné nutné pro správnou regulaci měničů Socomec, je použit systém DIRIS DIGIWARE. Tento systém zajišťuje vzájemné propojení do jednoho celku a zpracovaná data posílá po sběrnici ModBus TCP/ IP do PLC. Stanice má ještě dvě obchodní měření, jedno pro spotřebu dobíjecích stanic a druhé pro výrobu z FVE. Vlastní řídicí systém BuildSys zajišťuje mimo jiné grafické rozhraní pro lokální nebo dálkové sledování jednotlivých veličin a parametrizaci režimů řízení.

[5]

### Nabíjecí stojany

V této dobíjecí lokalitě jsou instalovány dva dobíjecí stojany. Původně zde byl osazen stejnosměrný dobíjecí stojan s výkonem maximálně 50 kW, ale na konci roku 2019 byl nahrazen novou výkonnější dobíjecí stanicí Hypercharger 225/300 od společnosti Alpitronic, která konkrétně v této instalaci podporuje nabíjení pomocí dvou konektorů standardu CCS Combo 2, prvním s výkonem až 150 kW a druhý s výkonem až 50 kW, nebo pomocí konektoru CHAdeMO s výkonem až 50 kW. Je osazena dvěma 75 kW moduly. V případě, že se začne dobíjet první elektromobil s maximálním výkonem menším než 75 kW, může se připojit i druhý elektromobil a začít se současně také nabíjet, avšak výkonem maximálně 75 kW. Kdyby se první elektromobil mohl nabíjet výkonem větším než 75 kW, zarezervuje si na celou dobu nabíjení oba moduly a další elektromobil se již současně nemůže začít dobíjet. Zobrazení a bližší technický popis této dobíjecí stanice je v kapitole 4.2.1.

Druhý dobíjecí stojan je od společnosti ENSTO. Dobíjecí stojan Chago Pro EVF 200 umožňuje dobíjet jeden nebo dva elektromobily střídavým proudem. Obsahuje dvě třífázové zásuvky Mennekes (3 x 32 A, 22 kW) a také obsahuje dvě zásuvky (1 x 16 A, 3,7 kW) pro nabíjení elektroskútru nebo elektrokola. Pro nabíjení na tomto stojanu musí mít každý svůj vlastní dobíjecí kabel.



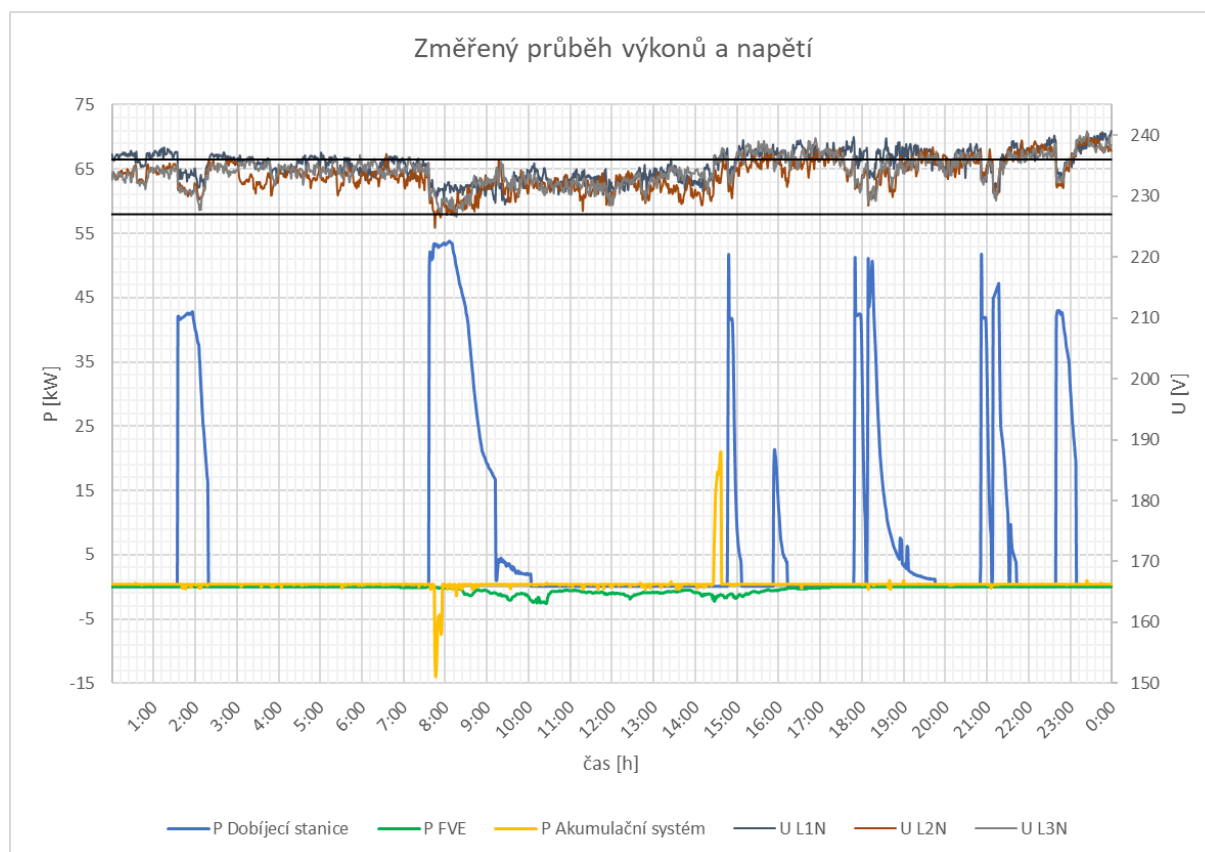
*Obr. 3-4 Nabíjecí stanice Chago Pro EVF 200 [7]*

### **3.3 Změřené průběhy**

Následující graf zobrazuje změřené průběhy výkonů a napětí v této dobíjecí stanici během jednoho dne (3. 3. 2019). Dostal jsem k dispozici data, kdy v této lokalitě byla ještě umístěna stejnosměrná dobíjecí stanice s výkonem 50 kW. Zobrazení je ve spotřebičovém režimu, kdy kladný výkon reprezentuje odběr, záporný výkon dodávku do sítě. Modrou barvou je vyobrazen třífázový činný výkon na vstupu do stejnosměrného dobíjecího stojanu. Z grafu lze vyčíst, že se zde během dne nabíjelo devět elektromobilů. Okolo 18:00 a 21:00 hodiny na sebe jednotlivá dobíjení těsně navazují. V těchto dvou okamžicích byla mezi po sobě následujícími dobíjeními zhruba minutová prodleva. Jelikož původní dobíjecí stojan umožňoval nabíjet stejnosměrným výkonem pouze jeden elektromobil, lze usoudit,

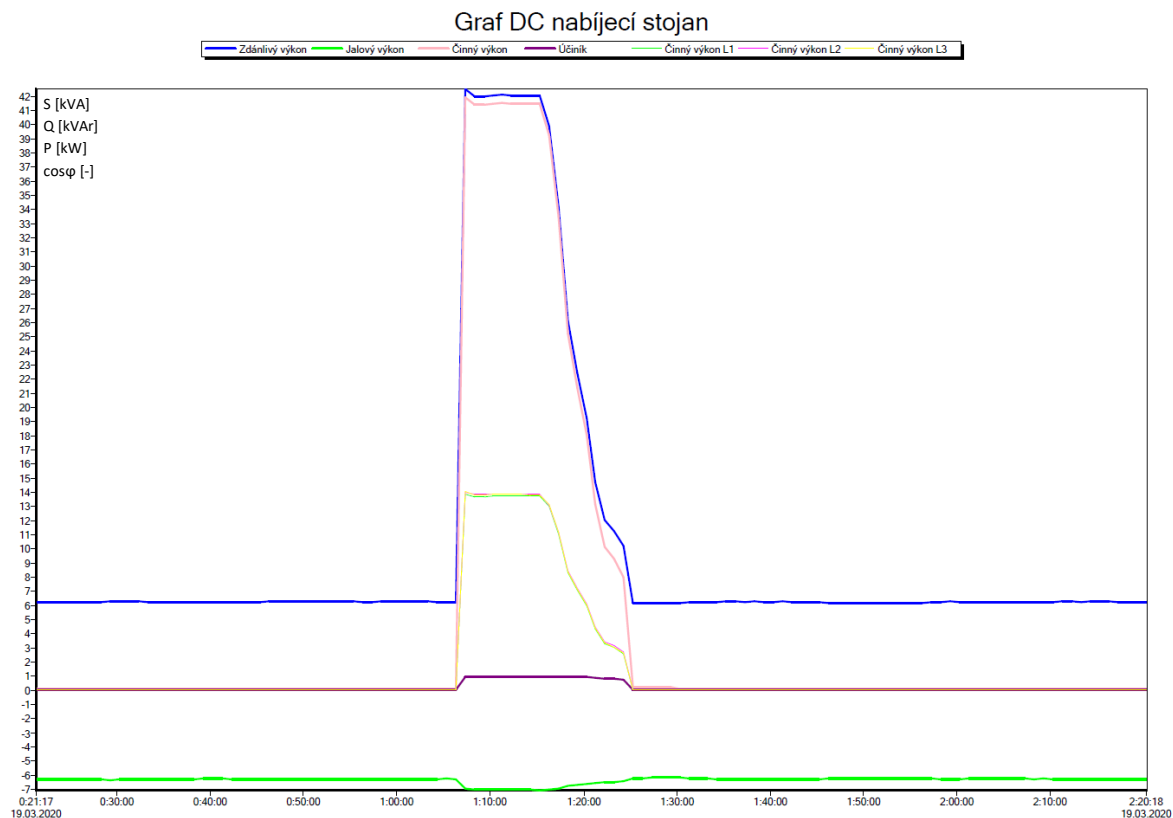


že druhý elektromobilista musel čekat, až se uvolní místo a poté se ihned připojil. Fotovoltaická elektrárna (zelená barva) v tomto období příliš elektrické energie nedodávala, dle průběhu byla v období pozdního dopoledne a začátku odpoledne pravděpodobně zatažená obloha. V horní části grafu jsou zobrazena napětí v jednotlivých fázích. Důvodem, proč nejsou napětí v jednotlivých fázích symetrická je, že dobíjecí stanice je připojena do distribuční soustavy společně s dalšími odběrateli, kteří převážně využívají jednofázové spotřebiče. V 7 hodin a přibližně 40 minut došlo k poklesu napětí pod nastavenou mez (227 V), z důvodu probíhajícího nabíjení elektromobilu. Vidíme, že na tento stav zareagoval akumulací systém dodávkou činného výkonu. Můžeme si všimnout, že akumulací systém nezareagoval na přepětí (nastavená mez 236 V) na začátku dne. To bylo způsobeno plným nabitím akumulátoru (SoC 98 %). Na přepětí zareagoval až okolo času 14:30, v tento okamžik mohl akumulátor zpětně pojmout energii, o kterou se předtím vybil. Dále se již na omezování přepětí opět nemohl podílet.



Obr. 3-5 Změřený průběh výkonů a napětí z 3. 3. 2019, zdroj PRE

Druhý graf zobrazuje průběh výkonů na přívodu do stejnosměrného dobíjecího stojanu během dobíjení jednoho elektromobilu (ze dne 19. 03. 2020). Je zde vykreslen třífázový zdánlivý, jalový i činný výkon. Činný výkon navíc taktéž v jednotlivých fázích. Dále je zde i účinník, nicméně jeho měřítko zobrazení není ideální. Z jednofázových průběhů činného výkonu je zřejmé, že dobíjecí stanice rozkládá zatížení po celou dobu dobíjení rovnoměrně mezi jednotlivé fáze. Dalším poznatkem plynoucím z tohoto grafu je charakter jalového výkonu. Odběr se projevuje jalovým kapacitním výkonem. Tento jev je dán z velké části přírodním kabelem a současně se tak projevuje i samotná dobíjecí stanice.



Obr. 3-6 Průběh výkonů na DC dobíjecím stojanu 19. 03. 2020, zdroj PRE

### 3.4 Shrnutí

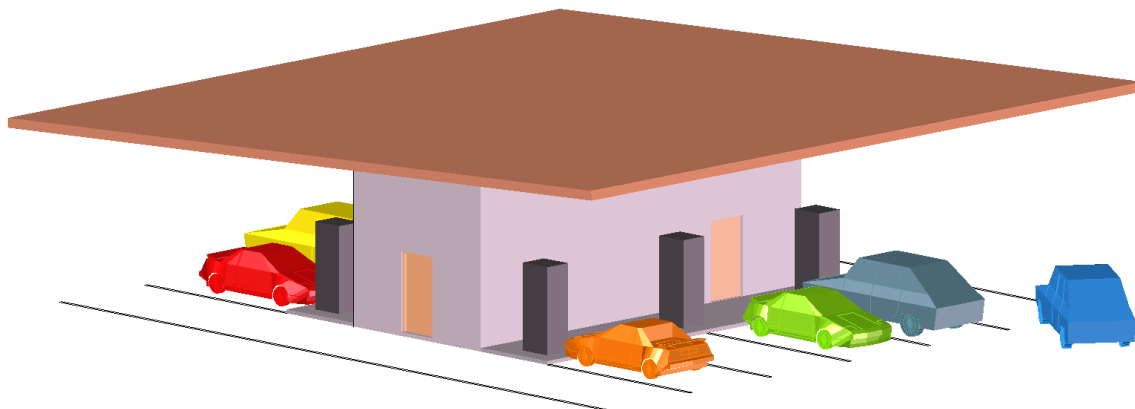
V návaznosti na první graf, nebyl akumulční systém provozován zrovna v ideální ustálené úrovni stavu nabití akumulátoru pro zajištění kompenzace napětí v distribuční síti. Bylo by vhodné snížit udržovací mez SoC akumulátoru, aby bylo možné odebírat energii v případě přepětí v síti. Nejideálnější provozní režim této dobíjecí stanice spočívá v kompenzaci vysokého odběru elektrické energie dobíjecími stojany, pomocí energie uložené v akumulčním systému. Jelikož je tato dobíjecí stanice vzdálena od distribučního transformátoru a připojena do soustavy s okolními odběrateli, dochází vlivem dobíjení elektromobilů vysokým výkonem k poklesům napětí v síti, vlivem ztrát na vedení. Akumulátor ale může poskytnout část výkonu a snížit tak okamžitý odebíraný výkon ze sítě, čímž zamezí nepříznivému úbytku napětí v místě připojení dobíjecí stanice a tím zůstanou zachovány kvalitativní parametry el. energie v distribuční soustavě. Akumulční systém se může také aktivně podílet na kompenzaci jalového výkonu a tím zlepšovat účinnost.

Provoz dobíjecí stanice, která je doplněna akumulčním systémem a ideálně i lokálním obnovitelným zdrojem elektrické energie má bezesporu přínosy na kvalitu el. energie v distribuční síti. Díky této dobíjecí stanici bylo ověřeno, že takovýto systém je provozuschopný a lze s jeho pomocí omezit zpětné vlivy vyvolané dobíjením elektromobilů a zlepšit parametry kvality napětí elektrické energie v místě připojení oproti stavu, kdy by akumulátor nebyl využíván. S rozvojem elektromobility bude do budoucna nutností umísťovat více takovýchto zařízení. Postupem času budou dobíjecí stanice instalovány z hlediska dostupného příkonu z distribuční soustav ve většině vhodných lokací. Bude nutné přistupovat k instalacím i v lokalitách, které by jinak nebyly vybrány. Aby se předešlo nutnosti posilování sítí, které může být z legislativního hlediska zdlouhavé a finančně nákladné nebo nemusí být povoleno dotčenými subjekty, bude nutností využívat lokální akumulční systém v blízkosti dobíjecí stanice, aby mohl být poskytnut požadovaný výkon. I v případě této dobíjecí stanice se zdá současný

výkon již jako limitní a pro případné budoucí navýšení bude nutné investovat do rozšíření přípojky, nebo do rozšíření akumulčního systému, aby byla dobíjecí stanice schopna poskytnout vyšší výkon. Podobný testovací projekt s FVE a akumulčním systémem již také spustila společnost ČEZ v rámci dobíjecí stanice ve Vestci u Prahy. Ani energetická společnost E.ON nechce zůstat stranou a již plánuje stavbu dobíjecí stanice s obdobnou konfigurací.

## 4 Vlastní návrh dobíjecí stanice

Navrhovaná dobíjecí stanice by měla být schopna bez problému obsloužit potřebu dobíjení s výhledem k roku 2030. Počáteční návrh předpokládá instalaci 6 ultrarychlých dobíjecích stojanů (300 kW). Každý stojan umožní současné dobíjení dvou elektromobilů. Jak by mohla taková dobíjecí stanice vypadat je zobrazeno na následujícím ilustračním obrázku.



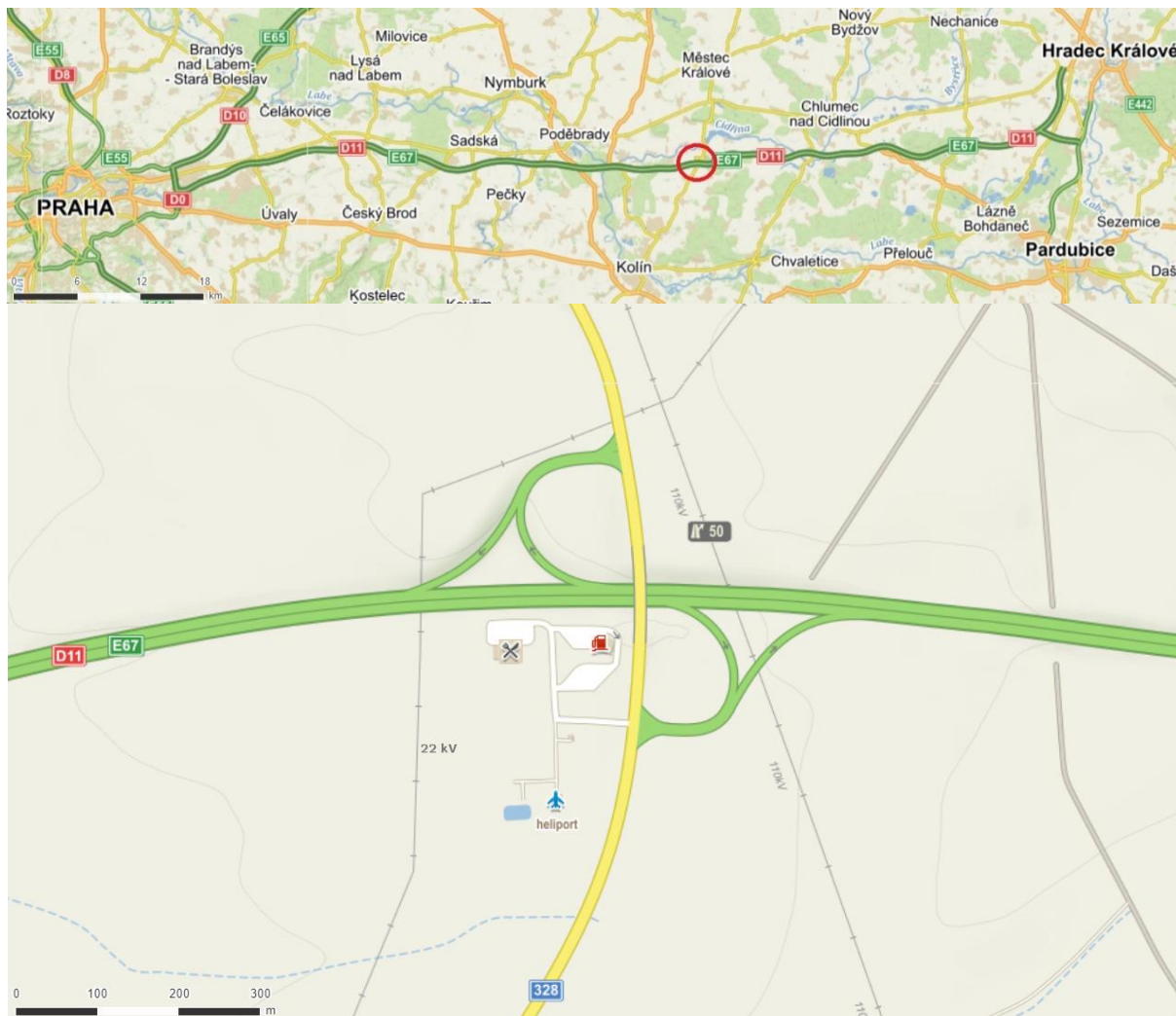
Obr. 4-1 Navrhované uspořádání dobíjecí stanice

Ve středu dobíjecí lokality se nachází budova, ve které bude umístěno technické zařízení, akumulátory včetně měničů napětí, střídače pro fotovoltaickou elektrárnu, řídicí systém, ochrany, jištění a další nutná elektronika zajišťující spolehlivý provoz dobíjecí stanice. Také je zde počítáno s odděleným prostorem, do kterého bude volný přístup. Zde budou toalety a dva automaty na nápoje a potraviny. Pokud by byla stavba dostatečně velká, bylo by vhodné zde umístit také stoly a sezení. Konkrétně tato varianta pro 6 ultrarychlých dobíjecích stojanů (3 na každé straně budovy) je navržena pro budovu 4 m širokou a 11 m dlouhou. Podél budovy jsou na každé straně kolmá stání pro 4 vozidla a dále dva elektromobily můžou zaparkovat na krajích každé řady. Dobíjecí stojany jsou umístěny mezi dvěma parkovacími místy, tak aby jeden stojan mohl nabíjet dva elektromobily. Krajní podélná stání jsou určena přednostně pro elektromobily s vlekm nebo pro užitková (nákladní) vozidla, ale pokud by byla všechna příčná parkovací místa obsazena, lze dobíjet osobní automobily i zde. Celkem může na této dobíjecí stanici dobíjet současně až 12 elektromobilů. Všechna stání se nachází pod střechou, na které bude umístěna fotovoltaická elektrárna. Střechu dobíjecí lokality jsem navrhl plochou se sklonem  $3^\circ$ , který zajistí odtok dešťové vody. Délka střechy je 20,5 m a šířka 19,5 m. Nejnížší část střechy je ve výšce alespoň 4,5 m nad zemí, aby pod ní mohla zajet i nákladní vozidla.

### 4.1 Umístění a odhad denní vytíženosti dobíjecí stanice

Pro umístění ultrarychlé dobíjecí stanice jsem si vybral lokalitu, která se nachází přibližně v polovině aktuálně zprovozněné dálnice D11, mezi Prahou a Hradcem Králové. Po dostavbě by dálnice měla vést až na hranice s Polskem, kde se napojí na polskou dálniční síť, která vede dále k Baltskému moři. Tato lokalita se nachází téměř ve středu trojúhelníku tvořeného velkými městy Poděbrady, Chlumec nad Cidlinou a Kolín. Výhodou tohoto místa je přibližně 100 m vzdálené distribuční vedení o napěťové hladině 22 kV (lokalitu protíná také vedení 110 kV), na které by se dalo připojit. Současně zde je vybudován obousměrný sjezd i nájezd zpět na dálnici (exit 50). U dobíjecí stanice by mohly zastavit jak elektromobilisté jedoucí po dálnici ve směru od Prahy, tak i směrem na Prahu. Další výhodou je, že se zde nachází stravovací zařízení. V případě jízdy s více spolucestujícími, si tak ostatní můžou zatím zajít

na občerstvení nebo i sám řidič, pokud by to stihl, než se elektromobil dobije, aby zbytečně neblokoval dobíjecí stojan případným ostatním zájemcům.



Obr. 4-2 Uvažované umístění dobíjecí stanice (podklad mapy.cz)

Pro simulaci provozu dobíjecí stanice potřebuji dále určit přibližný počet elektromobilů, který ji bude denně využívat. Vycházím z intenzity dopravy na daném úseku dálnice. Podle posledního celostátního sčítání dopravy v roce 2016, zde projelo denně přibližně 23 700 osobních a lehkých nákladních vozidel. Pro predikci intenzity dopravy v následujících letech jsem využil koeficienty vývoje intenzity dopravy pro lehká vozidla, zveřejněné v měsíčníku Silniční obzor z roku 2013 [24]. Porovnal jsem jejich odhad pro rok 2016, kdy proběhlo poslední sčítání dopravy, vzhledem k výchozímu roku 2010 předchozího celostátního sčítání dopravy. Pro konkrétní úsek dálnice se opravdu téměř přesně trefili s predikcí nárůstu dopravy o 20 %. K roku 2030 předpovídají nárůst dopravy o 75 % a k roku 2040 již o více než 100 % oproti roku 2010.

[23], [24]

Následující tabulka obsahuje odhadovaný celkový počet osobních vozidel a lehkých užitkových vozů (všech typů paliv), se kterými se počítá ve studii Predikce vývoje elektromobility v ČR v rámci NAP SG. Dále jsou zde uvedeny počty čistých elektromobilů pro různé scénáře, taktéž z této studie. Z těchto hodnot jsem spočítal procentuální podíl elektromobilů ve vozovém parku ČR. Další řádek obsahuje již zmíněnou intenzitu dopravy na konkrétním úseku dálnice D11. Za zjednodušujícího předpokladu rovnoměrného rozptýlení elektromobilů v rámci celé republiky, by nyní šlo odhadnout z procentuálního podílu elektromobilů a intenzity dopravy, kolik elektromobilů v daném úseku projede. Problémem

nicméně je, že procentuální podíl elektromobilů je pouze pro vozidla registrována v České republice, ale na intenzitě dopravy se také podílejí zahraniční vozidla. Podíval jsem se tedy na předpokládaný procentuální podíl elektromobilů ve světě. Dle studie společnosti BloombergNEF [25], vychází podíl elektrických vozidel (BEV a PHEV) téměř shodně s podílem elektromobilů pro vysoký scénář v ČR. Z této světové predikce jsem odečetl plug-in hybridy pro jednotlivé scénáře, které rychlodobíjení nebudou téměř využívat. Předpokládám, že dálnici využijí ze 7 % cizinci. Je jisté, že nebude potřeba dobíjet všechny elektromobily, které pojedou kolem této dobíjecí stanice. Z průzkumů vyplývá, že většina elektromobilistů preferuje domácí dobíjení nad veřejným. V preferenci způsobů dobíjení EV zobrazené ve studii Predikce vývoje elektromobility v ČR v rámci NAP SG je např. uvedeno, že až 70 % uživatelů nikdy nevyužije rychlé veřejné dobíjení. Zvolil jsem, že 5 % českých řidičů zastaví na této dobíjecí stanici v roce 2020 a až 70 % elektromobilistů ze zahraničí, kteří budou pravděpodobně cestovat na delší vzdálenost. Dále je ve využitosti této dobíjecí stanice počítáno s předpokládaným rozšiřováním ostatní dobíjecí infrastruktury. V již zmíněné studii je uveden nárůst potřebného počtu dobíjecích bodů pro elektromobily např. pro střední scénář z 339 v roce 2020 k 80 555 v roce 2040. Ze získaného počtu dobíjecích stanic v ČR jsem spočítal jejich poměrnou křivku rozvoje v jednotlivých scénářích. Tato narůstající křivka dobíjecích stanic posloužila pro určení snížení potřeby využití této konkrétní dobíjecí lokality v jednotlivých letech. Například procentuální potřeba dobíjení elektromobilů ze zahraničí se tím snížila na 30 % v roce 2040. Na základě přijatých předpokladů jsou na posledních třech řádcích tabulky uvedeny odhadnuté denní počty dobíjení elektromobilů v dané dobíjecí stanici pro jednotlivé scénáře.

[19], [25]

Tab. 4-1 Denní vytiženost dobíjecí stanice, určeno pomocí [19], [23], [24], [25]

Rok	2020	2025	2030	2035	2040
Celkový počet osobních vozidel [ks]	6 375 000	6 860 000	7 140 000	7 060 000	6 770 000
Počet BEV - nízký scénář [ks]	3 800	7 000	33 000	113 000	266 000
Počet BEV - střední scénář [ks]	4 900	31 000	88 000	304 000	705 000
Počet BEV - vysoký scénář [ks]	19 000	174 000	571 000	1 172 000	2 326 000
Procentuální podíl BEV - nízký scénář [%]	0,06	0,10	0,46	1,6	3,9
Procentuální podíl BEV - střední scénář [%]	0,08	0,45	1,2	4,3	10
Procentuální podíl BEV - vysoký scénář [%]	0,30	2,5	8,0	17	34
Intenzita dopravy [ks·den <sup>-1</sup> ]	27 300	31 200	34 125	37 050	39 585
Intenzita dopravy BEV - nízký scénář [ks·den <sup>-1</sup> ]	27	57	242	772	1 918
Intenzita dopravy BEV - střední scénář [ks·den <sup>-1</sup> ]	33	164	506	1 748	4 399
Intenzita dopravy BEV - vysoký scénář [ks·den <sup>-1</sup> ]	94	780	2 691	6 073	13 402
Počet dobíjených BEV - nízký scénář [ks·den <sup>-1</sup> ]	9	20	66	132	172
Počet dobíjených BEV - střední scénář [ks·den <sup>-1</sup> ]	11	29	87	184	252
Počet dobíjených BEV - vysoký scénář [ks·den <sup>-1</sup> ]	17	65	197	372	497

## 4.2 Základní komponenty systému

Proto, abych mohl vytvořit simulaci celého systému, potřebuji znát typické parametry jednotlivých komponent (dostupný výkon, kapacita akumulčního systému, účinnost apod.). Proto jsou dále vybrány a popsány konkrétní modely, s jejichž parametry je následně počítáno.

### 4.2.1 Dobíjecí stojan

Průzkumem trhu současných dobíjecích stanic jsem vybral dva zástupce s odlišnými rychlodobíjecími systémy.

#### ABB Terra HP

První systém zastupuje dobíjecí stanice Terra HP od společnosti ABB. Jedná se o modulární systém tvořený napájecí skříní (power cabinet) a odděleným výdejním stojanem (charge post).



Obr. 4-3 Dobíjecí stanice ABB Terra HP [26]

Jedna napájecí skříň dokáže dodávat nepřetržitě až 160 kW a špičkově až 175 kW (375 A). Spojením dvou napájecích skříní lze získat špičkový výkon až 350 kW (500 A). Systém umožňuje dobíjení elektromobilů s napětím trakčního akumulátoru 400 V DC, tak i elektromobilů nové generace s napětím až do 920 V DC. Napájecí skříň obsahuje oddělovací transformátor, výkonové měniče a další potřebnou elektroniku zajišťující bezpečný provoz. Po usměrnění je stejnosměrný elektrický proud veden k výdejnímu stojanu, který umožňuje dobít jeden elektromobil. Stojan obsahuje elektroniku zajišťující komunikaci s elektromobilem, napájecí skříní nebo vzdálenou správou a mimo další ochranné

prvky, tvoří velkou část nabíjecího stojanu kapalinové hospodářství s čerpadlem, které zajišťuje chlazení kabelu a konektoru CCS Combo 2 připojeného k dobíjenému elektromobilu. Pomocí kapalinou chlazeného kabelu a konektoru CCS může dosáhnout nabíjecí proud až 500 A (350 kW). V případě nechlazeného kabelu standardu CHAdeMO je to pouze 200 A. Díky chlazení může být kabel značně tenčí a lehčí, což je výhodné z pohledu uživatelské přívětivosti. Ke dvěma napájecím skříním může být připojen druhý nabíjecí stojan. Díky technologii dynamického sdílení výkonu, tak mohou být dobíjeny současně dva elektromobily. Každý jednotlivý stojan umožňuje dobíjení maximálním výkonem (350 kW), v případě současného dobíjení dvou elektromobilů je dostupný výkon (350 kW) dynamicky dělen mezi oba nabíjecí stojany. S rozvojem elektromobility v budoucnu mohou být díky modularitě systému přidávány další napájecí skříně a výdejní stojany.

Tento systém odděleného nabíjecího stojanu od napájecí skříně je velmi výhodný pro instalace na již postavených parkovištích, kde výdejní stojan díky svým rozměrům nezabírá příliš místa. Napájecí skříně mohou být umístěny stranou, až ve vzdálenosti 60 m.

V této tabulce jsou shrnuty základní parametry dobíjecí stanice Terra HP.

Tab. 4-2 Parametry nabíjecí stanice ABB Terra HP [26]

Nabíjecí stanice ABB Terra HP	
Výrobce	ABB EV Infrastructure
Model	Terra HP
Krytí/prostředí	IP 54, venkovní použití
Ochrana před vnějšími mechanickými rázy	IK 10 (displej: IK 08)
Provozní teplota	-35 °C až 55 °C (s omezeními)
Napájecí skříň	
Výstupní výkon	175 kW maximální 160 kW trvalý (375 A)
AC vstup	3 x 400 V (±10 %) / 50 Hz, 3P + PE 277 A jmenovitý při 400 V AC (160 kW výstup) 308 A špičkový při 360 V AC (175 kW výstup)
Účinnost (plné zatížení)	≥ 94 %
Účinník	≥ 0,97
EMC emise	Standardní: třída A (průmyslová) Volitelná: třída A (rezidenční) s externím filtrem
Rozměry (Š x V x H)	(1 170 x 2 030 x 770) mm
Hmotnost	1 340 kg
Nabíjecí stojan	
Výstupní DC proud	500 A CCS (chlazený kapalinou) 200 A CHAdeMO
Rozsah výstupního DC napětí	150-920 V (CHAdeMO max. 500 V)
Vybavení	Dotykový displej, čtečka RFID karet/čipů, síťové připojení, barevné osvětlení
Rozměry (Š x V x H)	(620 x 2 390 x 440) mm
Hmotnost	250 kg

[26]



### **Alpitronic Hypercharger 300**

Druhý systém reprezentuje dobíjecí stanice Hypercharger 300 od společnosti Alpitronic. Výhodou tohoto systému je kompaktnost. Celá technologie potřebná pro dobíjení elektromobilů je v jednom zařízení. Z toho ale může plynout jistá nevýhoda oproti předchozímu systému, a to instalace na některá již postavená parkoviště s těsnými parkovacími místy. Kvůli větším rozměrům v porovnání s výdejním stojanem Terra HP, mohou nastat případy, kde tuto dobíjecí stanici nebude možné umístit. Nicméně s přihlédnutím k součtu rozměrů napájecích skříní a vlastních nabíjecích stojanů předchozí dobíjecí stanice, je tato verze opravdu kompaktní a zabírá menší celkovou plochu.



*Obr. 4-4 Dobíjecí stanice Hypercharger 300 [6]*

V této dobíjecí stanice mohou být osazeny až čtyři výkonové moduly po 74 kW. Výkony jednotlivých modulů se sčítají a elektromobil lze nabíjet výkonem až 300 kW. Tohoto výkonu je dosahováno v celém teplotním rozsahu uvedeném v tabulce níže, při snížení teploty k 30 °C lze dosáhnout výkonu až 350 kW. Výstupní proud dobíjecí stanice by mohl být až 700 A, ale dostupnou technologií kabelu a konektoru je omezen na 500 A. Stanice může mít nainstalovány až čtyři dobíjecí kabely, kdy každý modul může napájet jeden vývod, čímž lze současně dobíjet až čtyři elektromobily. Lze si zvolit standard konektoru CHAdeMO (do 125 A) nebo CCS Combo 2. CCS Combo 2 může být nechlazený (do 200 A) nebo aktivně chlazený kapalinou (do 500 A). Pro umožnění nabíjení vysokým výkonem je nutností aktivně chlazený CCS Combo 2. Volitelně lze také na dobíjecí stanici umístit zásuvku pro AC nabíjení výkonem až 22 kW. Provozní režim při současném nabíjení více elektromobilů by měl jít nastavit. V základu se ale využívá funkce, kdy první elektromobil, který zahájí nabíjení si rezervuje takový počet modulů, jejichž součet je rovný nebo nejbližší vyšší k maximálnímu výkonu, který je elektromobil schopen využít. Tento výkon je poté daným elektromobilem zabrán po celou dobu jeho dobíjení, i kdyby dobíjecí výkon klesl až pod 75 kW. V okamžiku, kdy by se připojil druhý elektromobil, mohl by se nabíjet maximálním výkonem rovným součtu pouze nevyužitých modulů. Nevýhodou této dobíjecí stanice je neumožnění dynamického dělení výkonu v případě současného dobíjení více elektromobilů, vždy se dělí pouze v poměru výkonů celých modulů.

I pro tento dobíjecí stojan jsou v následující tabulce uvedeny základní parametry.

Tab. 4-3 Parametry dobíjecí stanice Alpitronic Hypercharger 300 [6]

Nabíjecí stanice Alpitronic Hypercharger 225/300	
Výrobce	Alpitronic GmbH
Model	Hypercharger 300
Maximální DC výstupní výkon	300 kW (čtyři 75 kW moduly)
Rozsah výstupního DC napětí	150-1 000 V
Maximální výstupní DC proud	500 A (s aktivně chlazeným kabelem a konektorem)
AC vstupní napětí	3 x 400 V ( $\pm 10\%$ ) / 50 Hz ( $\pm 5\%$ )
AC vstupní proud a příkon	466 A, 320 kW při 300 kW DC výstupního výkonu
Účinnost (při plném výkonu)	94 %
Účinník s aktivní PFC kompenzací	> 0,99
Celkové harmonické zkreslení (THDI, ve všech provozních bodech)	< 7 %
Krytí/prostředí	IP 54, venkovní i vnitřní instalace
Provozní hlučnost	< 45 dBA
Provozní teplota	-30 °C až 55 °C
Vybavení	Dotykový displej, čtečka RFID karet/čipů, síťové připojení
Rozměry (Š x V x H)	(732 x 2 235 x 854) mm
Hmotnost	700 kg

[6]

Dle společnosti ENERGI-SERVIS, která je autorizovaným dodavatelem dobíjecí stanice Hypercharger pro Českou republiku je cena 300 kW modelu 1 600 000 Kč bez DPH. V případě stejné konfigurace je cena dobíjecí stanice od ABB vyšší přibližně o 60 % [27]. Pro návrh dobíjecí stanice jsem vybral dobíjecí stojan Hypercharger, pro jehož provozní režim bude vytvořen simulační model.

#### 4.2.2 Akumulační systém

Pro ukládání elektrické energie jsem vybral lithiový akumulátorový systém TS HV 70 od německého výrobce TESVOLT. Možné využití zařízení je velmi široké, od pokrývání vlastní zvýšené spotřeby, omezování zátěžových špiček, pro systémy připojené k elektrizační soustavě, tak i pro systémy pracující v ostrovním režimu. Tento systém je díky špičkovým prizmatickým článkům velmi bezpečný, robustní a je navržen až na 30 let provozu, případně 8 000 cyklů. Díky velmi vysoké životnosti je tento systém také efektivní z ekonomického hlediska. Vysoké napětí umožňuje snížení průřezu jinak silných propojovacích vodičů, zároveň dochází ke snížení ztrát a celková účinnost je velmi vysoká. Systém je také velmi výkonný, dokáže se nabíjet trvalým výkonem 1C (C-rate), a stejně tak rychle lze energii dodávat z akumulátoru. Špičkově (max. 20 s) lze dodávat energii výkonem odpovídajícím až 4C. Akumulační systém může být složen až ze šestnácti bateriových modulů (4,8 kWh), kde každý modul má vlastní odnímatelný „Active Battery Optimizer“ (ABO), který se stará o rovnoměrné vybalancování všech článků v modulu a zároveň o optimalizaci modulu vzhledem k ostatním. Celý „Battery management system“ dále obsahuje řídicí jednotku tzv. „Active Power Unit“, která umožňuje propojení až 16 bateriových modulů (2 racky). Tato jednotka řídí nabíjení a vybíjení celého akumulátorového systému a mimo jiné zajišťuje komunikaci s okolními systémy.



Obr. 4-5 Akumulátorový systém TESVOLT TS HV 70 [33]

Přehled jednotlivých parametrů tohoto systému udává následující tabulka.

Tab. 4-4 Parametry akumulátorového systému TESVOLT TS HV 70 [33]

Lithiový akumulátorový systém TESVOLT TS HV 70	
Energie (14   16 bateriových modulů)	67 kWh   76 kWh
Článek	Lithiový NMC prismatický (Samsung SDI)
C-rate	1C
Max. nabíjecí nebo vybíjecí proud	94 A
Balancování článků	Active Battery Optimizer
Očekávané cykly při 100 % DoD   70 % EoL   23 °C ±5 °C 1C/1C	6 000
Očekávané cykly při 100 % DoD   70 % EoL   23 °C ±5 °C 0,5C/0,5C	8 000
Účinnost (akumulátor)	až 98 %
Spotřeba energie (pohotovostní režim)	5 W (bez střídače)
Provozní napětí	666 až 930 V DC
Provozní teplota	-10 až 50 °C
Vlhkost vzduchu	0 až 85 % (nekondenzující)
Celková hmotnost (14   16 bateriových modulů, 2 racky)	824 kg   898 kg
Rozměry (Š x V x H)	(1 200 x 1 900 x 600) mm
Záruka (výkonu   na systém)	10 let   5 let
Třída krytí	IP 20

Díky modularitě systému lze propojit několik racků a zvýšit kapacitu uložení až do několika MWh. Akumulátorové systémy TESVOLT TS HV 70 jsou optimalizovány pro použití s třífázovými měniči SMA Sunny Tripower Storage 60. K jednomu měniči lze připojit až 4 bateriové systémy. Dostupný výkon v závislosti na energetické kapacitě uložení a počtu měničů je vyobrazen na následujícím obrázku.



Obr. 4-6 Konfigurace systému - dostupný výkon v závislosti na energii a počtu měničů SMA STPS 60 [33]

[33]

### **Akumulátorový měnič SMA Sunny Tripower Storage 60**

K akumulátorovému systému TESVOLT TS HV 70 je pro optimální spolupráci doporučován měnič Sunny Tripower Storage 60 od společnosti SMA Solar Technology.

Tento měnič se vyznačuje vysokou výkonovou intenzitou 75 kVA vzhledem k hmotnosti 77 kg. Modularita umožňuje přidáváním dalších měničů rozšíření, až do výkonu v řádu MW. Maximální účinnost dosahuje až 98,8 %. Umožňuje čtyřkvadrantový provoz. Pro svoji univerzálnost a nízké náklady je vhodný pro různé aplikace, především pro vysokonapěťové akumulátory. Snadno se integruje pomocí komunikačního standardu Modbus. Podrobné parametry tohoto měniče jsou popsány v následující tabulce.



Obr. 4-7 Řídicí jednotka Inverter Manager a měnič SMA Sunny Tripower Storage 60 [34]

Podrobné parametry tohoto měniče jsou popsány v následující tabulce.

Tab. 4-5 Parametry měniče SMA Sunny Tripower Storage 60 [34]

Měnič SMA Sunny Tripower Storage 60	
Připojení akumulátoru (DC)	
Max. DC nabíjecí výkon	60 kW
Rozmezí DC napětí	575-1 000 V
Max. DC proud	140 A
Připojení k třífázové síti (AC)	
Max. činný výkon	75 kW
Max. zdánlivý výkon	75 VA
Max. jalový výkon	75 VAr
Jmenovité napětí	3 x 400 V ±10 % (3P + PE)
Rozsah AC napětí	360-530 V
Frekvence (rozsah)	50 Hz (44-55 Hz)
Účinnost při jmenovitém výkonu / nastavitelný účinnost	1 / 0 kapacitní až 0 induktivní
Celkové harmonické zkreslení (THD)	≤ 1 %
Max. účinnost	98,8 %
Ochranná zařízení	Vstupní odpínač, monitoring zemního spojení, monitoring sítě, integrovaný DC i AC svodič přepětí, AC zkratová odolnost, monitorování reziduálních proudů
Obecné informace	
Rozměry (Š x V x H)	(570 x 740 x 306) mm
Hmotnost	77 kg
Provozní teplota	-25 °C až 60 °C
Provozní hlučnost (typická)	58 dB(A)
Spotřeba energie (pohotovostní režim)	< 3 W
Topologie / chlazení	Beztransformátorový / aktivní
Třída krytí	IP 65
Datové rozhraní	SunSpec Modbus TCP (přes externí SMA Inverter Manager)
Záruka (základní)	5 let

Pro provoz měniče je vždy nutný tzv. Inverter Manager. Tato jednotka zajišťuje komunikaci mezi měniči a akumulátory, slouží jako centrální rozhraní pro systém sběru dat, nahrávání do cloudových služeb a řízení. Jeden Inverter Manager může řídit až 20 měničů. Popis základních parametrů této jednotky je uveden v tabulce níže.

Tab. 4-6 Parametry SMA Inverter Manager [34]

SMA Inverter Manager	
Vstupní napětí	9-36 V
Spotřeba energie	< 20 W
Rozměry (Š x V x H)	(160 x 125 x 49) mm
Hmotnost	920 g
Provozní teplota	-40 °C až 85 °C
Třída krytí	IP 21
Rozhraní	
PC uživatelské rozhraní	LCS tool
Rozhraní senzoru / protokol	RS485 / Modbus RTU pro SunSpec Alliance
Rozhraní střídače	1 ethernet port (RJ45)
Rozhraní pro vnější síť / protokol	1 Ethernet port (RJ45) / Modbus TCP, SunSpec Alliance

[34]

## 4.2.3 Návrh fotovoltaické elektrárny

### Výběr fotovoltaického modulu

K průzkumu současného trhu s fotovoltaickými moduly jsem využil dva online obchody ([28], [29]), které nabízejí jejich velký sortiment.

Pro vzájemné porovnání jsem jednotlivé moduly seřadil vzestupně podle jejich účinnosti, která je úměrná výkonu modulu vztáženému na plochu jednoho metru čtverečního (standardní testovací podmínky (STC) 1 000 W·m<sup>-2</sup>). Výběr pouze podle kritéria nejvyššího výkonu není vhodný, protože důležitou roli hraje také cena modulu. Proto jsem vytvořil jednoduché ekonomické vyhodnocení pomocí čisté současné hodnoty (NPV), která se spočítá podle následujícího vzorce:

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t} \quad (4.2-1)$$

- kde:
- $NPV$  ... čistá současná hodnota [Kč]
  - $CF_t$  ... peněžní toky v jednotlivých letech [Kč]
  - $r$  ... diskontní úroková míra [-]
  - $t$  ... pořadový rok v rámci hodnocení projektu [-]
  - $n$  ... doba hodnocení projektu [roky]

Peněžní tok v nultém roce je tvořen výdajem za cenu modulu vztáženou na 1 m<sup>2</sup>. Peněžní toky v dalších letech představují zisk, který ušetří generovaná elektrická energie oproti odběru elektřiny z distribuční sítě. Všechny ceny, se kterými je v této práci počítáno jsou bez DPH. Cena odebírané silové elektrické energie je uvažována 1,2 Kč za kWh, stanovené na základě ceny elektřiny na burze za posledních

několik let. Je předpokládána její meziroční eskalace v průměru o 2,5 %. K ceně silové elektřiny jsou dále připočteny složky z platby za odebranou elektřinu, které jsou závislé na množství odebrané elektrické energie z distribuční soustavy (cena za systémové služby, za použití sítí provozovatele distribuční soustavy, na podporu elektřiny z podporovaných zdrojů energie a daň z elektřiny), jejichž cena vychází na 0,667 Kč za kWh. [43] Celková cena elektřiny v prvním roce tedy vychází 1,867 Kč za kWh. Dále je ve výpočtu uvažována meziroční degradace modulu o 0,8 % a průměrná doba ročního využití instalovaného výkonu 1 000 h. Hodnocení dobíjecí stanice pomocí NPV bude provedeno pro dobu 20 let. Diskont jsem zvolil 5 %.

Parametry několika vybraných modulů jsou v následující tabulce.

Tab. 4-7 Výběr fotovoltaických modulů, na základě [28], [29]

Výrobce a typ	Cena (bez DPH) [Kč]	Výkon [ $W_p$ ]	Účinnost [%]	Šířka [mm]	Výška [mm]	Výkon na plochu [ $W_p \cdot m^{-2}$ ]	NPV 20 let [ $Kč \cdot m^{-2}$ ]
EXE Solar 290Wp POLY	2 052	290	17,56	996	1 658	176	3 138
Canadian Solar 335Wp POLY	2 507	335	18,11	1 048	1 765	181	3 162
Suntech Power 370Wp MONO	2 820	370	18,80	992	1 988	188	3 250
AEG 310Wp MONO	2 531	310	19,09	992	1 640	191	3 197
JA Solar 325Wp MONO	2 875	325	19,50	991	1 678	195	3 146
LONGi Solar 320Wp MONO	2 963	320	19,60	991	1 650	196	3 069
JA Solar 340Wp MONO	3 194	340	20,20	996	1 689	202	3 143
Jinko Solar 345wp MONO	4 052	345	20,45	1 002	1 684	204	2 699

Nejlépe dle účinnosti (výkonu na  $1 m^2$ ) vychází modul od výrobce Jinko Solar. Nicméně tento modul je v porovnání s ostatními nejdražší. Jeho volba by nastala v případě, kdy bychom požadovali pouze maximální množství vyrobené energie a nezajímala by nás cena investice. Dle NPV v 20. roce vychází ekonomicky nejvýhodněji modul společnosti Suntech Power s výkonem  $370 W_p$ . Na druhé pozici dle NPV je hned následující modul. Je vhodné kombinovat NPV společně s účinností a vybrat ekonomicky výhodný modul, ale zároveň s nejvyšší účinností. Vždy je to o hledání kompromisu. Já jsem pro svoji práci vybral již zmíněný modul od výrobce Suntech Power, se kterým budu dále pracovat.



Obr. 4-8 Fotovoltaický modul Suntech Power HyPro STP370S - 24/Vfh [32]

Tento modul využívá technologii polovičních fotovoltaických článků, která vede ke snížení velikosti generovaného proudu a tím ke snížení ztrát způsobených průchodem proudu. Díky tomu může modul poskytovat o několik wattů vyšší výkon a zároveň roste jeho účinnost. Životnost modulu je 25 let, do této doby by mělo být garantováno, že výkon neklesne pod 80 % počáteční hodnoty. V prvním roce provozu může výkon klesnout na 97,5 % a poté by neměl meziročně poklesnout o více než 0,7 %.

Tab. 4-8 Parametry fotovoltaického modulu Suntech Power HyPro STP370S - 24V/fh [32]

Fotovoltaický modul Suntech Power HyPro STP370S - 24V/fh	
Parametry při STC	
Maximální výkon (Pmax)	370 W <sub>p</sub>
Optimální provozní napětí (Ump)	38,7 V
Optimální provozní proud (Imp)	9,57 A
Napětí naprázdno (Uoc)	47,4 V
Proud nakrátko (Isc)	9,95 A
Účinnost modulu	18,8 %
Parametry při NOCT	
Maximální výkon (Pmax)	273,9 W <sub>p</sub>
Optimální provozní napětí (Ump)	36,1 V
Optimální provozní proud (Imp)	7,59 A
Napětí naprázdno (Uoc)	43,7 V
Proud nakrátko (Isc)	8,06 A
Teplotní charakteristiky	
Normální provozní teplota článku (NOCT)	45 ±2 °C
Teplotní koeficient výkonu (Pmax)	-0,40 %·(°C) <sup>-1</sup>
Teplotní koeficient napětí (Voc)	-0,34 %·(°C) <sup>-1</sup>
Teplotní koeficient proudu (Isc)	0,060 %·(°C) <sup>-1</sup>
Obecné informace	
Provozní teplota	-40 °C až 85 °C
Maximální napětí systému	1 500 V
Maximální hodnota sériové pojistky	20 A
Fotovoltaický článek	Monokrystalický křemík
Počet článků	144 (6 x 24)
Připojovací box	IP 68, 3 bypass diody, konektor MC4
Rozměry modulu (Š x V x H)	(992 x 1 988 x 40) mm
Hmotnost modulu	22,3 kg

STC – standardní testovací podmínky (intenzita záření 1 000 W·m<sup>-2</sup>, teplota modulu 25 °C, AM 1,5), NOCT – nominální provozní teplota článku (intenzita záření 800 W·m<sup>-2</sup>, teplota okolí 20 °C, AM 1,5, rychlost větru 1 m·s<sup>-1</sup>)

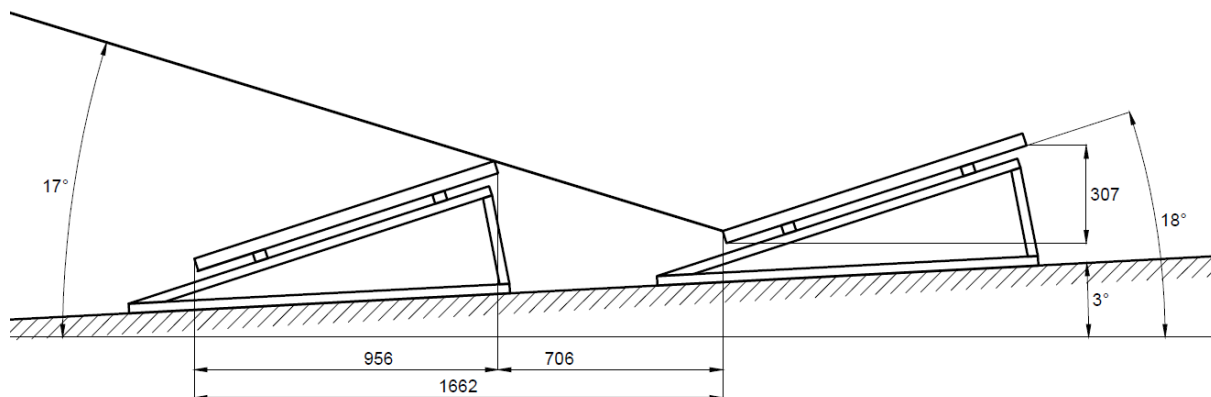
[32]

### **Volba sklonu a rozložení fotovoltaických modulů**

Před výběrem potřebného střídače je nejdříve nutné určit instalovaný výkon celé fotovoltaické elektrárny. Jak již bylo zmíněno, je předpokládána instalace na plochou střechu se sklonem 3°. Takto skloněná střecha je přímo orientována na jih, což je výhodné z hlediska maximálního využití energie slunečního záření. Délka střechy je 20,5 m a šířka 19,5 m (šikmá část). Předpokládám instalaci modulů naležato na nosnou konstrukci, která bude ke střeše pevně připevněna.



Při návrhu rozložení modulů je nutné stanovit rozestupy mezi jednotlivými řadami, aby nedocházelo ke vzájemnému stínění. Tyto rozestupy se stanovují pro nejhorší možný případ, který nastane v zimním období, kdy je Slunce nejnižší nad obzorem. Pro naše území dopadají sluneční paprsky v tomto období na zemský povrch pod úhlem  $17^\circ$  [30]. Na následujícím obrázku je vyobrazeno rozložení s dopadajícím paprskem pod úhlem  $17^\circ$ , pro sklon modulů  $18^\circ$ .



Obr. 4-9 Návrh rozestupů mezi jednotlivými řadami modulů (rozměry v mm)

Navrhl jsem čtyři různé sklony modulů vzhledem k horizontální rovině. První případ zastupuje instalaci rovnoběžně se sklonem střechy, druhý předpokládá instalaci na nosnou konstrukci se sklonem  $15^\circ$  (včetně sklonu střechy  $18^\circ$ ), třetí je pro sklon modulů  $25^\circ$  a poslední případ je pro optimální sklon  $33^\circ$ , který je uváděn v našich zeměpisných podmínkách s ohledem na výtěžnost elektrárny. [30] U instalace modulů je předpokládána 20 mm vzájemná mezera pro upevnění a zajištění prostoru při tepelné dilataci. Na tuto střechu lze do jedné řady umístit 9 modulů, včetně respektování volného prostoru 1 m od okrajů střechy. Vlivem různého sklonu modulů lze na střechu umístit odlišný počet řad, tak aby nedocházelo ke vzájemnému stínění. Největší počet modulů lze osadit pro jejich rovnoběžné natočení se střechou. V tomto případě bylo ještě počítáno s metrovými rozestupy vždy mezi dvěma řadami modulů, aby byla umožněna jejich bezproblémová údržba, případně výměna. Sice nejsou moduly natočeny s optimálním sklonem, zato jich lze na střechu umístit větší počet a tím vyšší instalovaný výkon. Pomocí softwaru PVGIS jsem získal roční vyrobenou energii pro jednotlivé varianty. Dále jsem pro porovnání uvedl v následující tabulce vyrobenou energii za měsíc s nejvyšší výrobou (červenec) a nejnižší (prosinec). Pro vzájemné porovnání jsem ještě vytvořil zjednodušené ekonomické vyhodnocení podobně jako při výběru modulu. Je počítáno se shodnými parametry ceny elektřiny, její eskalací, degradací modulů a diskontem.

Tab. 4-9 Návrh sklonu modulů, s využitím dat z PVGIS [31]

Sklon modulů [°]	3	18	25	33
Počet řad modulů [ks]	12	10	9	8
Instalovaný výkon [kW]	39,9	33,3	29,9	26,6
Vyrobená energie za rok [kWh]	36 806	33 895	31 250	28 254
Vyrobená energie za červenec [kWh]	5 340	4 544	4 058	3 543
Vyrobená energie za prosinec [kWh]	681	880	901	899
Investice [Kč]	304 550	253 790	228 410	203 030
NPV za 20 let [Kč]	613 543	591 690	551 092	501 738

Je uvažována investice pouze do vlastních modulů, investici do kotevních prvků, kabelů apod., považují za přímo úměrnou počtu modulů. Náklady za měniče pro poslední tři případy lze předpokládat shodné, pouze pro první případ by bylo třeba vybrat výkonnější měniče, případně jejich vyšší počet. Čímž by se snížila ekonomická výhodnost této varianty. V případě sklonu modulů pouze 3° by bylo zapotřebí zajistit častější údržbu. Smívání nečistot deštěm by neprobíhalo tak intenzivně jako při vyšší sklonu modulů. Mohlo by na modulech setrávat např. listí a jiné nečistoty, v zimě by nedocházelo k sesunutí případně sněhové pokrývky. Další nevýhodou tohoto sklonu je nízká generace elektrické energie v zimních měsících, kdy dopadají sluneční paprsky pod nízkým úhlem. Naproti tomu v létě je výroba podstatně vyšší.

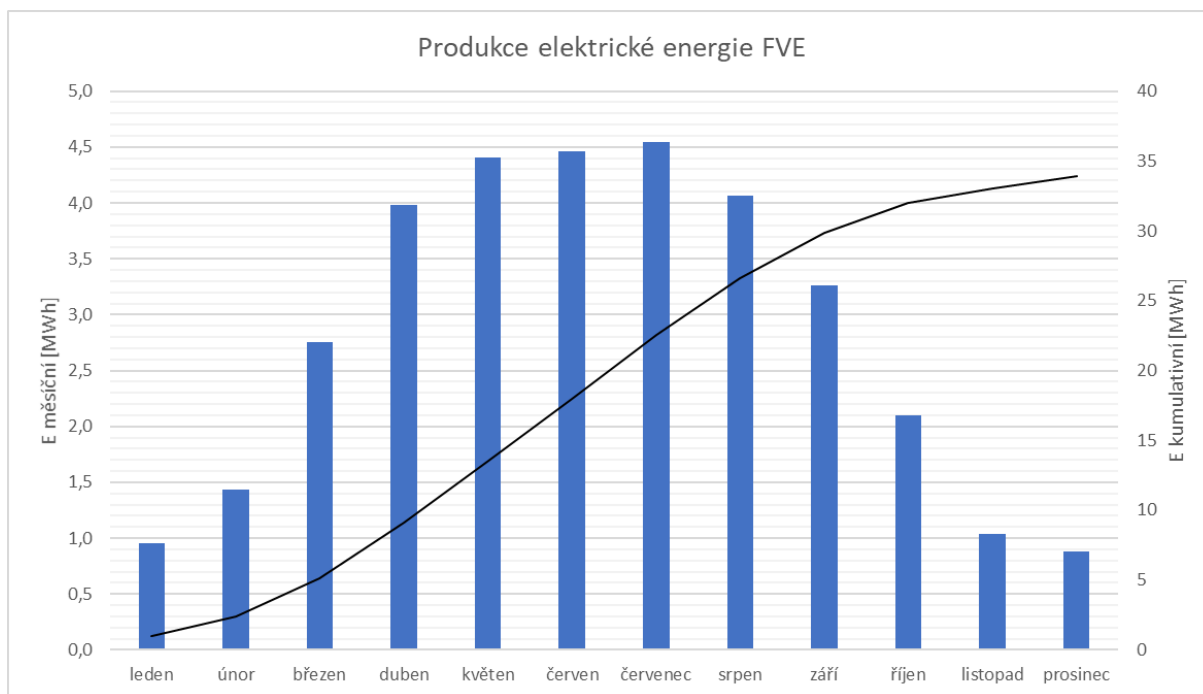
S ohledem na popsané nedostatky nízkého sklonu 3° jsem zvolil střední cestu, ve formě výběru sklonu modulů 18°. U této varianty je produkce elektrické energie v zimních měsících téměř podobná jako u následujících dvou variant, ale letní a celková roční produkce je vyšší. NPV také vychází vyšší pro tuto variantu sklonu. V projektu budu tedy počítat s instalovaným výkonem fotovoltaické elektrárny 33,3 kW.

Pro danou lokalitu, natočení modulů a instalovaný výkon obsahuje následující tabulka průměrnou produkci elektrické energie fotovoltaické elektrárny v jednotlivých měsících, včetně měsíčního průměru během celého roku. V posledním sloupci je uvedena průměrná denní produkce elektrické energie vždy v daném měsíci, včetně celoročního průměru na posledním řádku. Hodnoty byly získány pomocí systému PVGIS. Odhadované systémové ztráty, obsahující ztráty v kabelech, ve střídačích, vlivem znečištění modulů apod., byly nastaveny na výchozích 14 %. K těmto ztrátám se ještě připočítávají ztráty vlivem odrazu při nízkém úhlu dopadu slunečních paprsků, ztráty nebo zisky vlivem změn spektra záření, ztráty při nízkém ozáření a ztráty při vysoké teplotě modulů. Celkové průměrné roční ztráty, které jsou zahrnuty ve výsledcích, činí přibližně 20 %.

Tab. 4-10 Produkce elektrické energie FVE, dle [31]

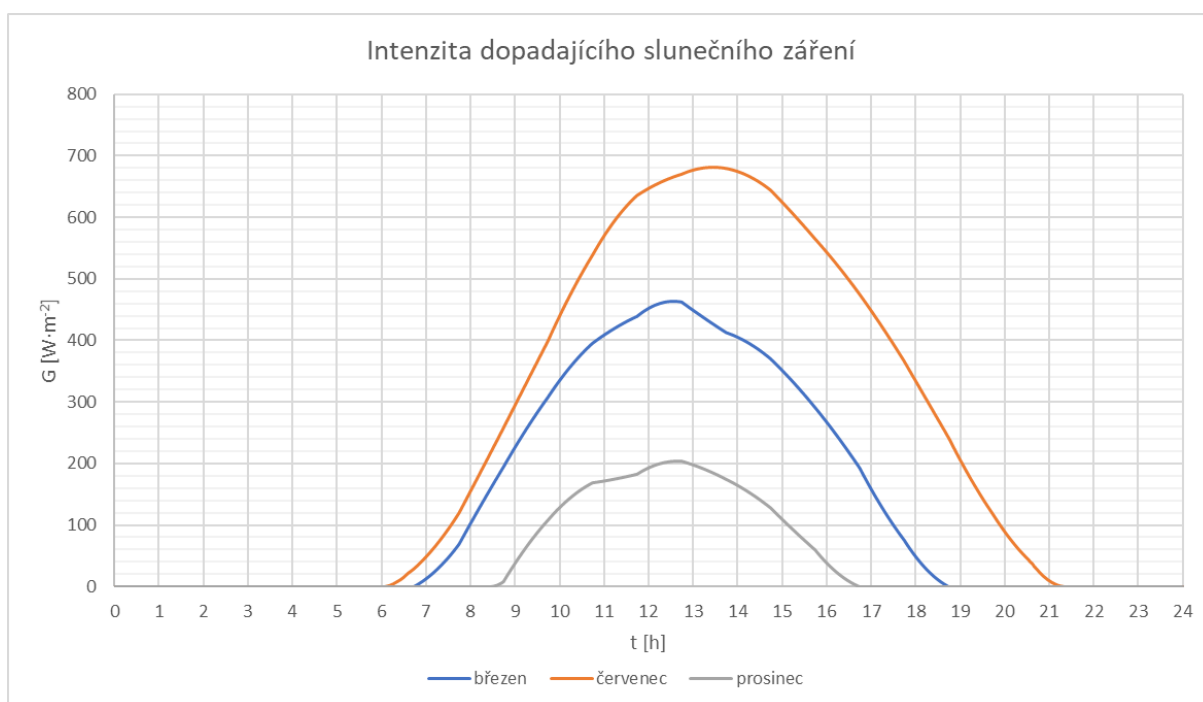
Měsíc	E měsíční [kWh]	E denní [kWh]
leden	958	31
únor	1 438	51
březen	2 755	89
duben	3 986	133
květen	4 406	142
červen	4 464	149
červenec	4 545	147
srpen	4 067	131
září	3 263	109
říjen	2 095	68
listopad	1 039	35
prosinec	881	28
Roční průměr	2 825	93

Následující graf zobrazuje průměrné měsíční produkce elektrické energie FVE z předchozí tabulky. Současně je zde také vykreslena kumulativní vyrobená energie. Za celý rok vyrobí tato fotovoltaická elektrárna přibližně 33,9 MWh elektrické energie.



Obr. 4-10 Produkce elektrické energie FVE, dle [31]

Pro simulaci fotovoltaické elektrárny během dne budu využívat průběh intenzity dopadajícího slunečního záření na  $1 \text{ m}^2$  orientované plochy fotovoltaického modulu. Jedná se o průměrný průběh během konkrétního měsíce. Po vydělení intenzitou záření  $1000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  (STC) a roznásobení instalovaným výkonem a účinností systému, lze získat odpovídající průběh výkonu FVE. Druhý způsob, jak lze tento výkon získat, je vynásobení intenzity dopadajícího záření celkovou plochou modulů, účinností modulu a účinností systému. Pro porovnání byly vybrány tři období. Prosinec reprezentuje nejnižší, březen střední a červenec nejvyšší průměrný výkon FVE a tím i produkci elektrické energie. Průběhy jsou pro čas odpovídající našemu území (UTC+1), v případě července je zohledněn letní čas (UTC+2).



Obr. 4-11 Intenzita dopadajícího slunečního záření, dle [31]

### Výběr fotovoltaického střídače

Propojení FVE s akumulacním systémem je uvažováno pomocí AC vazby (AC coupled system). Vzhledem k charakteru nestálé spotřeby, kterou lze v dobíjecí stanici očekávat, by bylo lepší DC propojení s využitím hybridního měniče. Tím by se v případě malé spotřeby v dobíjecí stanici mohl obejít jeden měnič při ukládání elektrické energie do akumulátoru. Nicméně, s ohledem na vysoké napětí akumulátoru a požadovaného vysokého výkonu k němu připojeného měniče, je obtížné na trhu najít vhodné zařízení. Samozřejmě by bylo možné nechat si zařízení vyrobit na míru, nebo systém poskládat z jednotlivých prvků, sledovače bodu maximálního výkonu (MPPT) pro fotovoltaické moduly, DC-DC měničů pro úpravu na vhodnou hladinu napětí a zajištění bezpečného nabíjení akumulátoru a následně střídače pro propojení s třífázovou sítí. Já ale využiji pro návrh zařízení, která jsou v široké míře dostupná na trhu a je zajištěna jejich bezproblémová spolupráce a jejich řízení.

Zvolil jsem fotovoltaický střídač Sunny Tripower 15000TL od výrobce SMA Solar Technology. Výběr tohoto výrobce je z důvodu volby produktů od jednoho výrobce, od kterého již mám vybraný střídač pro akumulátorové uložení, a tím by měla být zajištěna bezproblémová vzájemná spolupráce. Výstupní výkon tohoto střídače je 15 kW, účinnost dosahuje až 98,4 %, vstupní napětí může být do 1 000 V. Obsahuje dva nezávislé sledovače bodu maximálního výkonu a ke každému můžou být připojeny až tři řetězce fotovoltaických modulů a dále poskytuje řízený jalový výkon a účinník dle požadavku. Jednotlivé parametry jsou podrobněji popsány v následující tabulce.

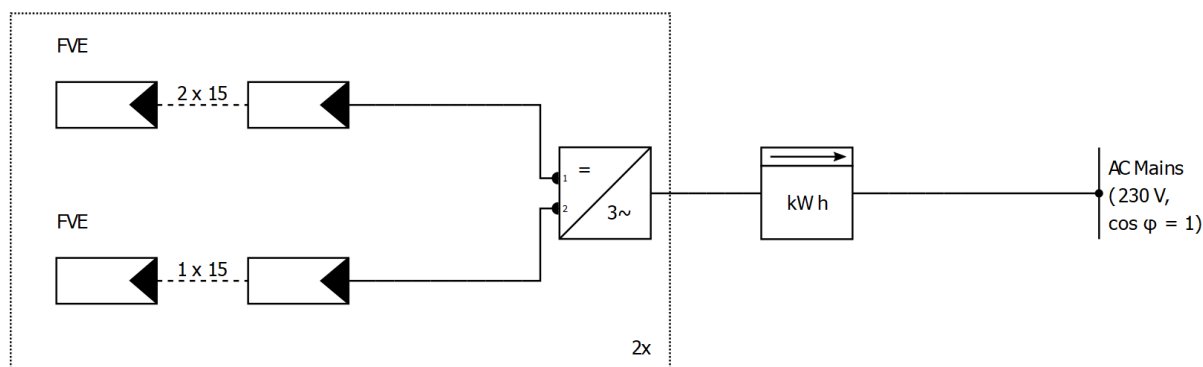
Tab. 4-11 Parametry střídače SMA Sunny Tripower 15000TL-30 [34]

Střídač SMA Sunny Tripower 15000TL-30	
Vstup (DC)	
Max. výkon FVE	27 000 W <sub>p</sub>
Jmenovitý výkon	15 330 W
Max. vstupní napětí	1 000 V
Rozsah napětí MPP / jmenovité vstupní napětí	240-800 V / 600 V
Min. vstupní napětí / spouštěcí napětí dodávky do sítě	150 V / 188 V
Max. vstupní proud (vstup A / vstup B)	33 A / 33 A
Počet nezávislých MPP vstupů / přípojek na MPP vstup	2 / A: 3; B: 3
Výstup (AC)	
Jmenovitý výkon (při 230 V, 50 Hz)	15 000 W
Max. zdánlivý výkon	15 000 VA
Jmenovité napětí	3 x 400 V (3P + N + PE)
Rozsah napětí	180-280 V
Frekvence (rozsah)	50 Hz (44-55 Hz)
Max. výstupní proud / jmenovitý	29 A / 21,7 A
Účinník při jmenovitém výkonu / nastavitelný účinník	1 / 0 kapacitní až 0 induktivní
Celkové harmonické zkreslení (THD)	≤ 3 %
Max. účinnost / evropská účinnost	98,4 % / 98 %
Ochranná zařízení	DC odpínač, monitoring zemního spojení, monitoring sítě, volitelný integrovaný DC svodič přepětí, DS zpětná ochrana, AC zkratová odolnost, monitorování reziduálních proudů
Obecní informace	
Rozměry (Š x V x H)	(661 x 682 x 264) mm
Hmotnost	61 kg

Provozní teplota	-25 °C až 60 °C
Provozní hlučnost (typická)	51 dB(A)
Spotřeba energie (v noci)	1 W
Topologie / chlazení	Beztransformátorový / OptiCool
Třída krytí	IP 65
Rozhraní	RS485, Speedwire, Webconnect, SMA Modbus, SunSpec Modbus
Funkce	OptiTrac sledování globálního MPP, integrované řízení elektrárny, Q na požadavek 24/7, Off-grid provoz
Záruka (základní)	5 let

### Návrh propojení modulů

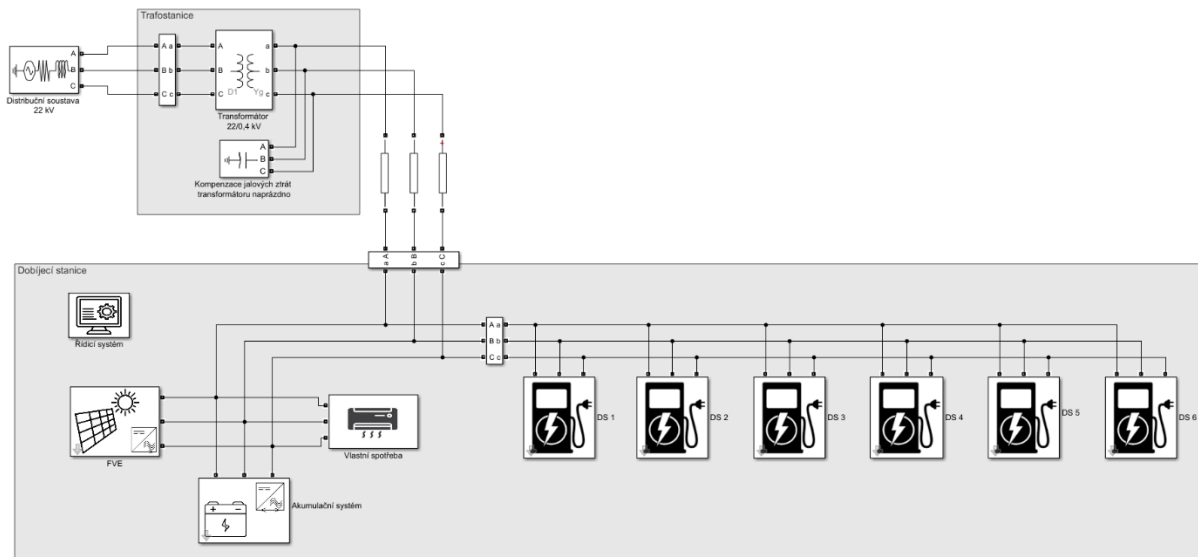
Protože navrhovaná fotovoltaická elektrárna má špičkový výkon 33,3 kW<sub>p</sub>, budou potřeba dva střídače. S ohledem na vstupní parametry střídače jsem navrhl zapojení modulů do šesti řetězců po patnácti modulech spojených sérově. V tomto případě bude napětí na řetězci 581 V (při STC), napětí naprázdno řetězce bude 711 V. Proud jedním řetězcem bude shodný s proudem vlastního modulu. V případě dvou vstupů měničů, na které budou připojeny po dvou řetězcích, bude proud dvojnásobný, i v tomto případě jsou splněny vstupní parametry střídače. Toto uspořádání je znázorněno na blokovém zapojení na následujícím obrázku, je zde vyobrazena pouze polovina fotovoltaického pole s jedním střídačem, ale paralelně je připojeno druhé shodné uspořádání (označeno obdélníkem s popisem 2x).



Obr. 4-12 Propojení fotovoltaických modulů (vytvořeno v programu PV\*SOL)

## 4.3 Simulační program

Pro otestování a navržení provozních režimů dobíjecí stanice s několika rychlodobíjecími stojany jsem využil prostředí Matlab Simulink. Simulace probíhá v rámci celého dne. Hlavní bloky představují jednotlivé prvky systému. Blok třífázového zdroje reprezentuje distribuční soustavu na hladině 22 kV, následuje distribuční transformátor 22/0,4 kV s vlastní kompenzací jalových ztrát naprázdno, na hladině nízkého napětí je připojena vlastní dobíjecí stanice. Dobíjecí stanice je složena z bloku reprezentujícího fotovoltaickou elektrárnu včetně střídače napětí, dále z akumulárního systému včetně měniče napětí, z bloku reprezentujícího vlastní spotřebu dobíjecí stanice a v neposlední řadě z jednotlivých dobíjecích stojanů. Nepostradatelnou součástí je taktéž systém měření a řídicí systém, zajišťující spolehlivý provoz.



Obr. 4-13 Základní blokové uspořádání dobíjecí stanice (Matlab Simulink)

Fotovoltaická elektrárna s ohledem na instalovaný výkon a účinnost systému určené v kapitole 4.2.3 Návrh fotovoltaické elektrárny, dodává do systému elektrickou energii podle průběhu intenzity dopadajícího slunečního záření během dne. Účinnost systému musela být v simulaci mírně upravena (77 % v létě), aby bylo docíleno shodné výroby elektrické energie odpovídající hodnotám získaným pomocí programu PVGIS. V bloku FVE se střídačem lze nastavit požadovaný účinník se kterým pracují střídače. V simulaci je uvažováno řízení na účinník roven jedné.

Dobíjecí stanice zajišťuje dobíjení elektromobilů podle předem vytvořených vstupních parametrů. V softwaru Matlab jsem vytvořil program, který generuje pro zadaný počet elektromobilů, které by se měly nabíjet během jednoho dne (4.1 Umístění a odhad denní vytiženosti dobíjecí stanice), jejich náhodné časy příjezdu k dobíjecí stanici s pravděpodobnostním rozložením dle 2.5 Rozložení časů zahájení dobíjení. Současně se zde vygeneruje konkrétní model elektromobilu s využitím podkladů uvedených v části 2.1 Současný stav elektromobility. Pro rok 2020 je uvažováno pro jejich náhodný výběr pravděpodobnostní rozdělení dáno počtem konkrétních elektromobilů registrovaných v ČR. Postupně k roku 2040 je předpokládán rozvoj elektromobilů s parametry směřujícími k větším kapacitám akumulátorů a možnosti nabíjení vyšším výkonem. Pro konkrétní elektromobil se vezme jeho kapacita akumulátoru, maximální výkon nabíjení a nabíjecí křivka (2.6 Dobíjecí charakteristiky EV). Dále se zde vygeneruje počáteční stav nabití akumulátoru EV, se kterým přijede k dobíjecí stanici, a požadovaný konečný procentuální stav nabití akumulátoru. Zvolil jsem hraniční kapacitu akumulátoru 40 kWh. Pro EV s kapacitou nižší než je tato hodnota jsou počáteční meze SoC nastaveny na 5-40 %, konečné na 60-80 % s minimálním dobitím 20 %. Pro vyšší kapacity vozidel je počáteční interval nastaven na 5-60 %, konečný na 50-80 %, s minimálním dobitím 10 %. Tyto vygenerované parametry jsou vstupními hodnotami do simulačního programu. V čase, kdy nastane okamžik požadavku nabíjení, probíhá výběr dobíjecího stojanu, na kterém se má začít elektromobil dobíjet. Přednostně se vždy vybírá první konektor dobíjecího stojanu, který je funkční (možnost vypnutí), v daný okamžik na něm již neprobíhá dobíjení jiného elektromobilu, současně neprobíhá dobíjení pomocí druhého konektoru tohoto stojanu vysokým výkonem (je dostupný alespoň jeden 75 kW modul v případě Hyperchargeru) a na tomto dobíjecím stojanu se za celý den nabíjelo nejméněkrát (rovnoměrné využívání všech dobíjecích stojanů). Pokud nastane situace, že se na všech prvních konektorech dobíjecích stojanů již dobíjí jiné elektromobily, začne se s výběrem druhého konektoru konkrétního dobíjecího stojanu dle shodných pravidel, pouze se záměnou, že se nesmí dobíjet vysokým výkonem na prvním konektoru. Vlastní dobíjecí stojan poté poskytuje výkon, který je v součtu omezen zadaným maximálním výkonem

dobíjecího stojanu (300 kW). Jakmile se začne nabíjet první elektromobil na prvním konektoru, omezí tak dostupný výkon případnému druhému vozidlu na druhém konektoru. Kdyby probíhalo současné dobíjení dvou elektromobilů, poté co se odpojí elektromobil, který se začal nabíjet jako první, převezme omezování výkonu druhý elektromobil, pro případ že by se připojilo k dobíjecí stanici další vozidlo. V řízení rozdělování výkonu je tedy použito pravidlo, kdy první připojený elektromobil má nárok na svůj maximální nabíjecí výkon po celou dobu nabíjení (nejkratší dobu nabíjení). V případě velkého odběru v rámci všech dobíjecích stojanů může být dostupný dobíjecí výkon omezován, což probíhá rovnoměrně (procentuálně z aktuálního dobíjecího výkonu jednotlivých elektromobilů) pro všechna současně dobíjená vozidla. Začít nabíjet na dobíjecím stojanu je umožněno až 90 sekund poté, co zde skončilo předchozí dobíjení (minimální čas představující odjezd vozidla a okamžitý příjezd dalšího elektromobilu). Podle zadaného účinníku kapacitního, nebo induktivního charakteru se dále vytváří odpovídající jalový výkon. V návaznosti na reálně změřené průběhy příkonu dobíjecí stanice (viz část 3.3) je u dobíjení v simulaci účinník nastaven na hodnotu 0,97 kapacitního charakteru. Jelikož účinnost dobíjecího stojanu je uváděna 94 % při plném výkonu, v simulaci je nastavena průměrná účinnost na 90 %. Současně je nastavena trvalá vlastní spotřeba 100 W.

Akumulátor v závislosti na řízení podporuje několik režimů provozu. Pro zajištění delší životnosti jsou na pevně nastaveny meze 10 % a 90 % SoC, mezi kterými se musí stav nabití pohybovat. Dále jsou nastaveny další dvě meze (SoC ustálené minimální – např. 50 % a SoC ustálené maximální – např. 70 %). Tyto dvě meze mají ještě hysterezi (SoC ustálené min. + 5 % a SoC ustálené max. - 5 %), aby se zamezilo častému spouštění nabíjení případně vybíjení. Mezi těmito dvěma mezemi by se měl stav nabití akumulátoru pohybovat většinu času, ale může je překročit. Při uvažování počátečního stavu nabití např. 60 %, jakmile začne FVE generovat elektrickou energii, začne se akumulátor nabíjet výkonem, který bude odpovídat výkonu FVE sníženému o aktuální příkon v celé dobíjecí stanici. Aktivuje se tzv. režim „ukládání“ elektrické energie z FVE. Touto energií se může akumulátor nabít až do maximální nastavené meze (90 %). Pokud bude stav nabití akumulátoru vyšší než SoC ustálené max. a začne se na dobíjecí stanici nabíjet elektromobil, akumulací systém se začne přednostně vybíjet výkonem maximálně ve výši odebíraného výkonu dobíjecí stanice, do okamžiku než stav nabití akumulátoru klesne pod SoC ustálené max. snížené o hysterezi. Důvod pro nastavení této meze (SoC ustálené max.) je, aby byla zajištěna určitá volná kapacita pro nabíjení akumulátoru z FVE, případně ze sítě při přepětí. Pokud by se žádný elektromobil nezačal dobíjet, mohla by FVE nabít akumulátor až na max. hodnotu, poté by nastala dodávka (prodej) generované elektrické energie do sítě. Důvod, proč je nastavena spodní mez (SoC ustálené min.) je, aby byla v akumulátoru po většinu času uložena energie, která by mohla posloužit v okamžiku, kdy by v síti nastalo podpětí nebo pro eliminaci odběrových špiček el. energie, pokud by se začalo současně nabíjet větší množství elektromobilů vysokým výkonem.

Akumulační systém společně s měničem slouží mimo jiné pro kompenzaci jalového výkonu, jelikož je nutné udržovat účinník odběru elektrické energie v rozmezí 0,95-1 induktivního charakteru. Nedodržení tohoto intervalu je penalizováno. Řídicí systém umožňuje nastavení požadovaného účinníku z daného intervalu vzhledem ke vstupu dobíjecí lokality a na tuto hodnotu probíhá kompenzace. Pokud je v dobíjecí stanici odebírán jalový výkon a nastane podpětí v síti, kompenzace probíhá vždy na účinník 1, tím se vykompenzuje veškerý odebíraný jalový výkon, což má nejvyšší přínos z pohledu omezení úbytku napětí. Pokud se v dobíjecí stanici vyskytuje kapacitní jalový výkon, probíhá kompenzace taktéž na účinník 1, aby nebyl přetok do sítě. Současně lze nastavit minimální účinník, který umožňuje měnič. Z něho se dopočítává minimální potřebný činný výkon, který je třeba dodávat/odebírat, aby mohl být poskytnut požadovaný kompenzační jalový výkon. Tento činný výkon se dále porovnává s aktuálně dodávaným/odebíraným činným výkonem měniče, který je podnícen jiným provozním režimem akumulací systému. Pokud je v absolutní velikosti již dodávaný/odebíraný činný výkon vyšší než minimální činný výkon potřebný pro zajištění kompenzace jalového výkonu, zůstane zachován tento již dodávaný/odebíraný činný výkon a současně se začne dodávat/odebírat potřebný kompenzační jalový

výkon. Zdánlivý výkon ( $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$ ) nikdy nesmí překročit maximální dosažitelnou hodnotu měniče. Pokud by tato hodnota měla být překročena, bude omezována velikost činného výkonu na úkor velikosti jalového výkonu. Kdyby byla potřeba kompenzovat jalový výkon a měnič by zrovna dodával/odebíral nižší činný výkon, než by byl minimální činný výkon pro zajištění kompenzace, zvýší se již dodávaný/odebíraný výkon na minimální nutnou hodnotu, při zachování jeho původního směru toku. Pokud by v daný okamžik měnič nedodával/neodebíral žádný činný výkon začne dodávat/odebírat minimální činný výkon potřebný pro zajištění kompenzace jalového výkonu. Jeho směr (nabíjení/vybíjení) se volí podle stavu nabití akumulátoru v okamžiku sepnutí kompenzace. Když je SoC nižší než hodnota odpovídající polovině mezi ustálenými mezemi SoC, probíhá nabíjení. Pokud je vyšší, probíhá vybíjení. Kdyby měla probíhat dlouhotrvající kompenzace jalového výkonu bez přerušování, je povoleno vybíjení pouze k hranici stavu nabití odpovídající nastavené minimální ustálené mezi SoC, poté se musí akumulátor začít nabíjet. Obdobně to platí pro nabíjení a maximální nastavenou ustálenou mez nabití.

Akumulační systém aktivně sleduje průběh napětí v síti. Požadavek na kvalitu elektrické energie stanovuje dovolenou maximální odchylku napájecího napětí  $\pm 10\%$  od jmenovitého napětí [35]. Pro spolehlivý provoz jsou na tento interval napětí navrhována elektrická zařízení, viz jejich podrobný popis. Aby nezačala regulace napětí až v okamžiku odchylky na hraniční mezi, lze v programu nastavit požadovanou odchylku při které se má začít regulovat napětí (konkrétně je nastaveno  $8\%$ ). Pokud napětí klesne na nastavenou mez a není akumulátor plně vybit, spustí se režim regulace napětí, který se snaží udržet napětí v intervalu nad nastavenou úroveň (hystereze). Při vzrůstu napětí nad horní mez nastaveného intervalu podpětí se regulace ukončí. V tomto režimu probíhá přednostně kompenzace induktivního jalového výkonu na účinník roven jedné. Což nejvíce omezí podpětí. Současně je do systému dodáván činný výkon v takové výši, aby byl schopen omezit podpětí, nicméně do maximální velikosti odebíraného výkonu v dobíjecí lokalitě a samozřejmě vždy s omezením maximálního výkonu měniče. Systém tedy reguluje podpětí do takové míry, aby plně vyrušil příspěvek vlastní dobíjecí lokality ke vzniklému podpětí (pokud by akumulaciční systém nebyl schopen omezit podpětí, začne se omezovat poskytovaný výkon v dobíjecích stojanech). Ale je zde připravena funkce, po jejíž aktivaci lze při podpětích vzniklých mimo vlastní dobíjecí lokalitu dodávat činný i jalový výkon do distribuční soustavy (dle požadavku provozovatele distribuční soustavy, bez uplatnění penalizace za nedodržení účinníku). Obdobně pracuje akumulaciční systém i v případě přepětí, s tím rozdílem, že se akumulátor místo vybíjení začne nabíjet a přednostně bude kompenzovat kapacitní jalový výkon, který by v síti způsoboval zvýšení napětí.

Akumulátor je využíván také pro snižování velkého soudobého odběru na dobíjecích stojanech. Tímto provozním režimem lze snížit velikost potřebné elektrické přípojky a taktéž čtvrt hodinová maxima odebíraného příkonu a tím šetřit finanční prostředky plateb za elektřinu. Pro tento účel lze v programu nastavit velikost přípojky k dobíjecí lokalitě. Jakmile by měl být v dobíjecích stojanech odebírán vyšší výkon, akumulaciční systém začne poskytovat výkon vyrovnávající odběr nad nastavenou mezí. Samozřejmě vždy pouze do velikosti maximálního výkonu, který je měnič schopen poskytnout. Současně lze dodávat elektrickou energii pouze po dobu, dokud se akumulátor plně nevybije (nastavená minimální bezpečnostní hladina). Jelikož velikost příkonu nastavené přípojky nesmí být překročena, odebíraný výkon dobíjecími stojany, který by měl být nad hranicí součtu příkonu z distribuční sítě a výkonu z akumulacičního systému (maximální výkon měniče je nedostatečný nebo je akumulátor již vybitý), je nutné omezit. Omezení neprobíhá tím způsobem, že by bylo zabráněno připojení dalšího elektromobilu, který by nutně potřeboval dobíjet. Smyslem je dodávat alespoň nějaký výkon nežli nulový. Omezování výkonu probíhá dynamicky a rovnoměrně na všech dobíjecích stojanech, na kterých se v daný okamžik dobíjí elektromobily. Vezme se výkon, jakým by se teoreticky mohly jednotlivé elektromobily dobíjet, vzhledem ke svému stavu nabití akumulátorů, teplotě apod. Od tohoto celkového



maximálního odběru všech elektromobilů (včetně vlastní spotřeby dobíjecí lokality) se odečte dostupný výkon elektrické přípojky, fotovoltaické elektrárny a akumulačního systému. Tato nadbytečná hodnota se vztáhne k celkovému odběru všech elektromobilů, čímž lze získat poměrnou (procentuální) hodnotu nutného omezení odebíraného výkonu. Pomocí této hodnoty se dynamicky udržuje snížený poskytovaný výkon v jednotlivých dobíjecích stojanech. Výhodou tohoto režimu řízení je možnost současného dobíjení všech elektromobilů a zároveň spravedlivé snížení výkonu a tím prodloužení doby dobíjení, všem elektromobilistům o shodnou procentuální hodnotu. Pokud se první elektromobil nabíjí např. 50 kW a druhý 150 kW a je nutné snížit výkon o 10 %, prvnímu se sníží na 45 kW a druhému na 135 kW. Je zamezeno nevhodnému snížení o pevnou hodnotu, např. 10 kW, což by prvnímu elektromobilu snížilo poskytovaný výkon až o 20 % a druhému pouze o 6,7 %. Zároveň je zamezeno jinému možnému režimu, který by spočíval ve vyšším omezování výkonu vozidlům, které nabízejí možnost nabíjení vyšším výkonem a nižším (až žádným) omezením vozidlům s nízkým nabíjecím výkonem. Podle mého názoru elektromobilista, který si pořídí elektromobil s možností rychlejšího dobíjení, si ho mimo jiné vybral právě kvůli této výhodě a neměl by být omezován v rychlosti dobíjení na úkor zachování dobíjecího výkonu dalším elektromobilům s nižší rychlostí obíjení.

Druhý případ, kdy by mohlo dojít k omezování dostupného výkonu dobíjecích stojanů je v případě, že by jejich odebírání výkonu nebyl ani tak vysoký, ale v síti by se vyskytlo podpětí. Podpětí by se samozřejmě v první řadě snažil vyrušit akumulátor, ať kompenzací odebíraného jalového výkonu, tak dodávkou činného výkonu. Nicméně pokud by dodávaný výkon nebyl dostatečný, případně by akumulátor byl již vybitý, muselo by se přistoupit k omezení poskytovaného výkonu dobíjecími stojany.

Původně bylo uvažováno s možností kompenzace odebíraného vysokého výkonu konkrétního dobíjecího stojanu (nebo skupiny dobíjecích stojanů). Např. šlo by zvolit, že dobíjecí stojan číslo jedna si může vzít z distribuční sítě konkrétní podíl svého maximálního výkonu, např. 50 %, a zbytek energie by poskytoval akumulátor. Tento režim by byl vhodný pro skupinu dobíjecích stojanů, kde by byly osazeny dobíjecí stojany s různými výkony. Vliv nejvýkonnějšího dobíjecího stojanu na síť by tímto šlo omezit. Jelikož já v projektu počítám s dobíjecími stojany shodného výkonu, je výhodnější omezovat pouze vysoký soudobý odběr a tento režim není aktivní.

Další režim akumulátoru je jeho prosté nabíjení. Nabíjení akumulátoru je pro zajištění určité energie pro případ kompenzace velkého odběru nebo podpětí. Tento režim se aktivuje v případě, že stav nabití akumulátoru klesne pod hladinu SoC ustálené min. a zároveň není jiný provozní režim (kompenzace velkého odběru dobíjecích stanic, regulace podpětí – včetně časové prodlevy pro zajištění stabilizace sítě). Nabíjecí výkon může být omezen dostupným výkonem vzhledem k elektrické přípojce a aktuálně odebíranému výkonu v dobíjecí stanici, současně je možné nabíjecí výkon omezit na procentuální podíl maximálního výkonu měničů (je nastaveno 80 %), aby nebyl akumulátor zbytečně zatěžován.

Jak již bylo zmíněno, akumulační systém má také režim vybíjení. Tento režim slouží pro uvolnění určité části kapacity akumulátoru pro ukládání energie z FVE nebo pro případný odběr energie ze sítě při přepětí. Aktivuje se v okamžiku, kdy stav nabití akumulátoru je vyšší než SoC ustálené maximální a na dobíjecí stanici se začne dobíjet elektromobil. Současně nesmí být přepětí (časová prodleva po skončení přepětí), ani aktivní režim ukládání z FVE (všechn generovaný výkon FVE je přímo spotřebováván na dobíjení elektromobilu) a také již nesmí probíhat režim kompenzace velkého odběru dobíjecími stojany. Vybíjecí výkon je omezen v maximální velikosti na výkon spotřebováváný dobíjecími stojany a vlastní spotřebou, snížený o výkon generovaný FVE (zabránění přetoku do distribuční sítě) a dále může být omezen nastaveným procentuálním podílem maximálního výkonu měničů (např. 80 %).

Poslední režim „ustálení“ reprezentuje stav, kdy je akumulátor v klidu. Není aktivní žádný dříve zmíněný režim, neprobíhá nabíjení ani vybíjení akumulátoru.

Vlastní spotřeba dobíjecí stanice je nastavena na konstantní průměrnou hodnotu 2 kW. Tímto blokem může být simulována spotřeba řídicího systému, příležitostně spouštěného chlazení nebo topení nebo dalších zařízení zajišťujících chod dobíjecí stanice.

### 4.4 Návrh optimálního uspořádání zařízení dobíjecí stanice

K vyhodnocení optimální varianty uspořádání (velikost akumulčního zařízení, velikost potřebného rezervovaného příkonu) takovéto dobíjecí stanice lze přistupovat z několika hledisek. Dobíjecí stanice může být provozována kompletně bez akumulčního systému. Takovýto provoz vlivem velmi proměnného zatížení má nežádoucí dopad na elektrizační soustavu. Je nutné mít zajištěný vysoký rezervovaný příkon (technické maximum) a provozovatel dobíjecí stanice musí platit vysoké měsíční poplatky za rezervovanou kapacitu příkonu (maximum čtvrt hodinového příkonu). Druhý opačný případ předpokládá snahu o co největší snížení rezervovaného příkonu z distribuční sítě a tím minimalizování odběrových špiček. Tato varianta předpokládá v každém případě instalaci co největšího akumulčního systému a jeho intenzivní navyšování souběžně s rozvojem elektromobility. Rezervovaný příkon ale musí být z energetického hlediska vždy dostatečný, aby bylo umožněno dobíjení akumulátoru.

Pro výběr vhodné kombinace velikosti akumulčního systému a velikosti potřebného příkonu z distribuční soustavy jsem zvolil metodu ekonomicko-technického vyhodnocení za sledované období 2020-2040 z pohledu provozovatele dobíjecí stanice.

Pro vzájemné ekonomické porovnání variant bez a s akumulací pro omezování odběrových špiček z distribuční sítě, jsou uvažovány pouze náklady na pořízení transformátoru a navýšení velikosti přípojky, pořizovací cena akumulčního systému a následně celoroční platba ze rezervovanou kapacitu příkonu, která se bude měnit vlivem využití akumulátoru v závislosti na požadovaném čtvrt hodinovém maximu příkonu. Ekonomického vyhodnocení za sledované období je pomocí NPV, se zvoleným diskontem 5 %.

V počátku je počítáno s nutnou investicí do pořízení transformátoru a elektrické přípojky k distribuční soustavě. Výkon transformátoru je s výhledem do budoucna uvažován 630 kVA, což je nejvyšší obvyklá hodnota výkonu transformátoru, který se v distribuční soustavě používá. Pro určení ceny transformátoru byla použita orientační částka 300 000 Kč uvedena v dokumentu: Průměrné ceny dopravní a technické infrastruktury obcí: Kapitola 4 – Zásobování elektrickou energií, vydaném Ministerstvem pro místní rozvoj ČR [46]. K této hodnotě jsem připočet náklady za jištění na straně vysokého napětí a za rozvaděč nízkého napětí. Celková cena za transformátor 630 kVA a základní vybavení činí 500 000 Kč. Je počítáno, že vlivem inflace bude docházet meziročně k navyšování této ceny. Na základě vývoje z posledních let, je meziroční inflace předpokládána 2,5 % [47]. S instalací transformátoru předpokládám jednorázovou platbu za navýšení rezervovaného příkonu z distribuční soustavy o stejnou hodnotu výkonu. V tomto případě je počítáno s cenou odpovídající měrnému podílu na oprávněných nákladech daných připojením a zajištěním požadovaného příkonu 800 000 Kč/MW, viz část věnovaná této problematice v kapitole 2.7. Tato částka je stanovena vyhláškou, ačkoli se může cena v budoucnu navyšovat, je počítáno s konstantní hodnotou. Tyto výdaje nastanou vždy, kdy je již současná přípojka nedostatečná.

Cenu uvažovaného akumulčního systému TESVOLT TS HV 70 včetně měniče SMA Sunny Tripower Storage 60 počítám 1 300 000 Kč za verzi s kapacitou 76 kWh. [48] U akumulátoru lze do budoucna předpokládat pokles investičních nákladů. Část ceny odpovídající vlastnímu akumulátoru byla s výhledem k roku 2040 exponenciálně snižována dle předpokládaného vývoje investičních nákladů pro Li-ion akumulátory [49]. Výkon zmíněného měniče je uvažován jak pro vybíjení, tak pro nabíjení akumulátoru shodně 60 kVA. V počáteční investici je pro ukládání el. energie z fotovoltaické elektrárny

předpokládáno umístění dvou akumulátorových jednotek v obou porovnávaných variantách. V první variantě ale není tento akumulátor využit pro snižování potřebného rezervovaného příkonu z distribuční sítě, nicméně ve druhé variantě společně s dalšími později instalovanými akumulátory tuto funkci již bude zastávat. Dále je ve výčtu investičních nákladů zahrnuta fotovoltaická elektrárna, která je v obou variantách shodná a na vzájemné vyhodnocování nemá vliv. Cena navržené FVE byla spočítána 576 800 Kč (moduly 253 800 Kč, střídače 101 500 Kč, konstrukce 121 500 Kč, ostatní vybavení 100 000 Kč) dle ceníku [29]. Shodně v obou variantách jsou zařazeny také dobíjecí stojany, jejichž aktuální cena je 1 600 000 Kč [27]. Jelikož tyto ultrarychlé dobíjecí stojany patří mezi poměrně nové technologie a také vlivem vyššího budoucího konkurenčního boje, lze u nich očekávat postupný pokles ceny. Meziročně je předpokládán pokles ceny o 2 %.

Pro vzájemné porovnání variant je dále nutné počítat se složkou za rezervovanou kapacitu příkonu z platby za odebranou elektrickou energii. Aktuální měsíční cena za roční rezervovanou kapacitu je 177 031 Kč za MWh a měsíc [43]. U této částky je počítáno s průměrným meziročním navyšováním o 1 %.

V návaznosti na probíhající rozvoj elektromobility do současné doby, jsem pro podrobnější analýzu zvolil střední scénář pro denní vytíženost navrhované dobíjecí stanice v jednotlivých letech. Simulace byly provedeny vždy v pětiletých řezech (2020, 2025, 2030, 2035, 2040), pro které byly určeny požadované počty dobíjených elektromobilů. Pro roční vyhodnocování byly získané hodnoty v pětiletých intervalech proloženy lineárně. První simulaci jsem spustil bez fotovoltaické elektrárny a akumulčního systému, abych zjistil soudobost příkonu celé dobíjecí stanice způsobenou dobíjením elektromobilů. Fotovoltaická elektrárna by během hodin, kdy produkuje el. energii, snižovala potřebný příkon z distribuční soustavy, ale na její intermitentní výkon se nedá spoléhat, proto bude její výkon jistým bonusem, který bude moci být využit nad úroveň velikosti rezervovaného příkonu z distribuční sítě. Pro dané roky jsem vždy provedl přibližně dvacet simulací, aby se zabránilo počítání s variantou, která by zrovna mohla vyjít z pohledu soudobosti zatížení příznivě. Z těchto variant byla vybrána pro každý rok jedna, s nejvyšším odebíraným příkonem v místě připojení k distribuční soustavě.

Změřený špičkový příkon posloužil pro určení okamžiku, kdy je nutné navýšit velikost technického rezervovaného příkonu a přidat další transformátor. Je zvoleno, že toto navýšení nastane v roce, kdy špičkový příkon přesáhne 80 % současného výkonu transformátoru a velikosti přípojky. Tím je docíleno včasného navýšení a zabránění nevhodnému přetěžování zařízení.

Pro určení potřebné rezervované kapacity příkonu, ve variantě bez využívání akumulčního systému pro snižování odběrových špiček, byla využita změřená maxima čtvrt hodinového příkonu, u kterých bylo počítáno navíc s rezervou 15 %. Vypočítané hodnoty potřebného rezervovaného příkonu byly zaokrouhleny nahoru na desítky kW. Tyto úrovně lze krátkodobě překročit pro zajištění špičkového příkonu, ale v rámci čtvrt hodiny musí být průměrný příkon nižší, jinak by bylo nutné zaplatit pokutu za překročení rezervované kapacity příkonu.

V případě varianty s využitím akumulčního systému pro omezování odběrových špiček ze sítě a tím i snižování potřebného rezervovaného příkonu, je potřebná rezervovaná kapacita příkonu dopočítána jako rozdíl maximálního změřeného příkonu a instalovaného výkonu akumulčního systému, zvýšena o rezervu 15 %. Funkce omezování odběrových špiček způsobených dobíjecími stojany je navržena na konstantní nastavenou hodnotu. Jelikož se příkon na této hodnotě může pohybovat po celou dobu měřeného čtvrt hodinového příkonu (rezervované maximum), je nutné minimálně pro tuto mez rezervovat kapacitu příkonu, která se v měsíčních částkách platí. Aby nemuselo docházet k případnému omezování poskytovaného výkonu dobíjecími stojany, není povoleno ani krátkodobě v rámci 15 minut překročit úroveň odpovídající rezervovanému maximu příkonu. Protože v případě, že by byl odebírána dlouhodobě vysoký výkon, aby se zabránilo platbě za překročení rezervovaného příkonu, musel by být

následně v rámci měřené čtvrt hodiny snižován odebíraný příkon ze sítě tak, aby v průměru byla hodnota nižší než sjednaná, ale v tomto okamžiku by již nemusel být dostatečný instalovaný výkon akumulčního systému.

Pro určení, v kterém roce se ekonomicky nejvíce vyplatí rozšířit akumulční systém, byla napsána jednoduchá optimalizační funkce, která postupně ve všech letech zkouší přidat zadaný počet akumulátorových jednotek (76 kWh, 60 kVA) a testuje, jak se změní NPV za sledované období. V případě, že přidáním akumulátoru stoupne NPV (oproti dříve uložené maximální hodnotě), uloží se jeho hodnota a pozice. Takto se v jednom cyklu nalezne nejideálnější rok, pro přidání nového akumulátoru, a na vybrané místo se umístí. Tento cyklus se opakuje do okamžiku, než se vyčerpá maximální počet dostupných akumulátorů nebo do okamžiku, kdy se již nebude NPV zvyšovat. Při vhodně zadaném maximálním počtu dostupných akumulátorů lze nalézt nejideálnější kombinaci, u které se již přidáním dalšího akumulátoru NPV nezvýší. Ekonomicky vychází nejlépe přidávání nových akumulátorů po jednom, ve vybraných letech. Nemyslím si ale, že je tato varianta, kdy jsou akumulátory přidávány po jednom v po sobě jdoucích letech, z praktického hlediska ta nejlepší (zvýšené náklady za přepravu, instalaci, strávený čas zařizováním atd.). Proto jsem se rozhodl, že je lepší rozšiřovat akumulční systém vždy minimálně po dvou jednotkách. Dále byla přidána technická podmínka, která stanovuje minimální podíl velikosti rezervovaného příkonu 40 % vzhledem k maximálnímu odebíranému příkonu dobíjecí stanice. Mít zajištěný určitý příkon z distribuční sítě je důležité z hlediska energetické bilance, aby bylo umožněno dostatečné nabíjení akumulčního systému. Také bylo zvoleno, že po přidání akumulátoru nebude meziročně docházet ke snižování rezervované kapacity příkonu a bude zachována hodnota z předchozího roku. Protože v následujících letech by stejně spolu s rozvojem elektromobility muselo dojít k navyšování nad konkrétní mez a finanční úspora by nebyla až tak závratná.

V návaznosti na maximální počet současně dobíjených elektromobilů by na začátku provozu dobíjecí stanice stačilo umístit pouze tři dobíjecí stojany. V roce 2025 by bylo vhodné přidat jeden další, ale již je rovnou počítáno s osazením druhé poloviny z celkového počtu šesti stojanů.

V první variantě bez akumulčního systému pro snižování odběrových špiček je nutné za sledované období přidat další dva transformátory a současně navýšit velikost přípojky (v roce 2026 a 2035). Rezervovaná kapacita příkonu z 270 kW v roce 2020 postupně narůstá až k hodnotě 1 220 kW roce 2040. Za sledované období vychází NPV výdajové části vybraných položek -32 196 000 Kč.

Pro druhou variantu vyšel výsledný stav nejlépe při instalaci 12 akumulátorových jednotek. Hned na začátku je doporučeno osadit místo dvou, rovnou čtyři a následně přidat další dvě v roce 2024, 2028, 2032 a 2034. Takto postačí pouze dva transformátory, kdy druhý je nutné přidat v roce 2037. V roce 2040 je dostačující rezervovaná kapacita příkonu pouze 720 kW. V průměru se potřebná rezervovaná kapacita přípojky pohybuje na 50 % oproti první variantě. NPV pro tuto konfiguraci vychází -28 129 000 Kč.

Druhá varianta s využíváním akumulčního systému pro omezování odběrových špiček je ekonomicky výhodnější o 4 066 000 Kč. Podrobněji jsou částky s doporučeným časovým rozložením úpravy systému zobrazeny v tabulce na následující stránce.

V první variantě lze náklady mírně snížit využitím jednosložkové platby za službu sítě provozovatele distribuční soustavy, ale pouze do roku 2025. V následujících letech je již výhodnější platit zvlášť za rezervovanou kapacitu a za použití sítě provozovatele distribuční soustavy. V tomto případě by úspora oproti původní verzi byla 352 000 Kč. Ve druhé variantě se tato volba platby nevyplatí, kvůli možnosti snížení velikosti rezervované kapacity příkonu využitím akumulčního systému.

Tab. 4-12 Ekonomické porovnání variant s doporučeným časovým rozložením úpravy systému

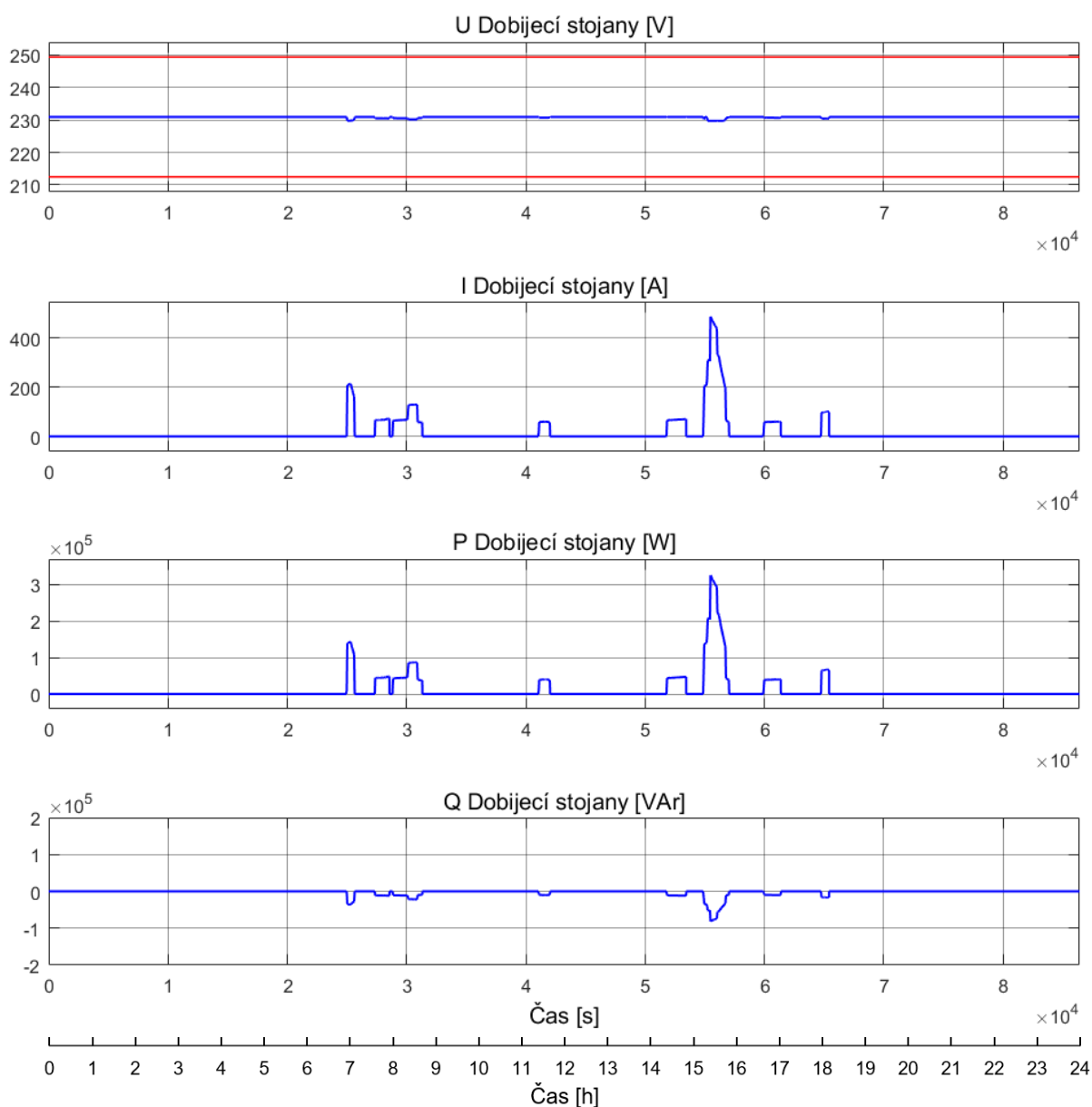
Rok		Varianta s akumuláčním systémem pro omezení odběrových špiček																				
		2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040
Odběr elektrické energie ze sítě [MWh/rok]		87	110	134	158	181	205	298	391	484	571	670	847	1024	1201	1378	1554	1655	1755	1855	1955	2056
Spíkový příkon dobíjecí stanice [kW]		332	366	399	433	466	500	543	586	628	671	714	781	847	914	980	1047	1106	1165	1225	1284	1343
Čtvrt hodinový příkon dobíjecí stanice [kW]		232	250	268	285	303	321	381	441	501	561	621	665	709	754	798	842	885	928	971	1014	1057
Výkon akumuláčního systému [kW]		120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120
Rezervovaná kapacita příkonu [kW]		290	310	330	350	370	440	510	580	650	720	770	840	940	1040	1140	1240	1340	1440	1540	1640	1740
Výkon akumuláčního s. a rezervované kapacity příkonu [kW]		390	410	430	450	470	490	560	630	700	770	840	890	940	990	1040	1090	1140	1190	1240	1290	1340
Kapacita akumuláčního systému [kWh]		152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152
Nová el. přípojka [kW]		630	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Nový transformátor [kVA]		630	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Počet nových akumuláčních s. (76 kWh, 60 kVA) [ks]		2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Počet nových dobíjecích stojanů [ks]		3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cena FVE [Kč]		-576 800	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cena přípojky [Kč]		-504 000	0	0	0	0	0	-504 000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cena transformátoru [Kč]		-500 000	0	0	0	0	0	-504 343	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cena akumuláčního systému [Kč]		-2 600 000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cena dobíjecích stojanů [Kč]		-4 800 000	0	0	0	0	0	-4 252 043	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Platba za rezervovanou kapacitu příkonu [Kč]		-573 580	-622 229	-671 792	-722 285	-773 721	-826 112	-892 228	-1 161 583	-1 334 226	-1 510 206	-1 689 572	-1 824 973	-1 962 912	-2 103 428	-2 246 558	-2 392 340	-2 540 813	-2 692 016	-2 845 990	-3 002 773	-3 162 408
Cash Flow [Kč]		-8 980 800	-573 580	-622 229	-671 792	-722 285	-773 721	-826 112	-892 228	-1 161 583	-1 334 226	-1 510 206	-1 689 572	-1 824 973	-1 962 912	-2 103 428	-2 246 558	-2 392 340	-2 540 813	-2 692 016	-2 845 990	-3 002 773
NPV v roce 2040 [Kč]		-32 195 906																				
Rok		Varianta s akumuláčním systémem pro omezení odběrových špiček																				
		2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040
Odběr elektrické energie ze sítě [MWh/rok]		95	120	146	172	198	224	314	403	492	582	671	714	781	847	914	980	1047	1106	1165	1225	1284
Spíkový příkon dobíjecí stanice [kW]		332	366	399	433	466	500	543	586	628	671	714	781	847	914	980	1047	1106	1165	1225	1284	1343
Výkon akumuláčního systému [kW]		240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240
Rezervovaná kapacita příkonu [kW]		140	150	160	170	180	230	280	330	380	430	480	530	580	630	680	730	780	830	880	930	980
Výkon akumuláčního s. a rezervované kapacity příkonu [kW]		380	390	400	410	420	470	520	570	620	670	720	770	820	870	920	970	1020	1070	1120	1170	1220
Kapacita akumuláčního systému [kWh]		304	304	304	304	304	304	304	304	304	304	304	304	304	304	304	304	304	304	304	304	304
Nová el. přípojka [kW]		630	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Nový transformátor [kVA]		630	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Počet nových akumuláčních s. (76 kWh, 60 kVA) [ks]		2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Počet nových dobíjecích stojanů [ks]		3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cena FVE [Kč]		-576 800	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cena přípojky [Kč]		-504 000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cena transformátoru [Kč]		-500 000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cena akumuláčního systému [Kč]		-2 600 000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cena dobíjecích stojanů [Kč]		-4 800 000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Platba za rezervovanou kapacitu příkonu [Kč]		-297 412	-321 842	-411 744	-503 411	-508 445	-513 529	-518 665	-592 180	-598 102	-627 316	-680 522	-829 533	-837 828	-894 561	-976 764	-1 035 859	-1 120 947	-1 208 270	-1 499 227	-1 668 207	-1 866 339
Cash Flow [Kč]		-8 980 800	-2 897 412	-321 842	-411 744	-503 411	-508 445	-513 529	-518 665	-592 180	-598 102	-627 316	-680 522	-829 533	-837 828	-894 561	-976 764	-1 035 859	-1 120 947	-1 208 270	-1 499 227	-1 668 207
NPV v roce 2040 [Kč]		-28 129 439																				
Úspora [Kč]		4 866 468																				

## 4.5 Ověření schopnosti provozu navrženého uspořádání

Nyní je nutné zpětně ověřit, zda navrhovaná varianta s aktivním využíváním akumulčního systému pro omezení odběrových špiček výkonu bude schopna bezproblémového provozu. Následující simulace budou provedeny již s fotovoltaickou elektrárnou a akumulčním systémem. Všechny parametry pro jednotlivé časové řezy budou nastaveny dle předchozí tabulky (kapacita a výkon akumulčního systému, velikost rezervované kapacity příkonu, přidání dalšího transformátoru). Zobrazení všech následujících průběhů je ve spotřebičovém režimu, odběr je kladný a dodávka do sítě záporná.

### Rok 2020

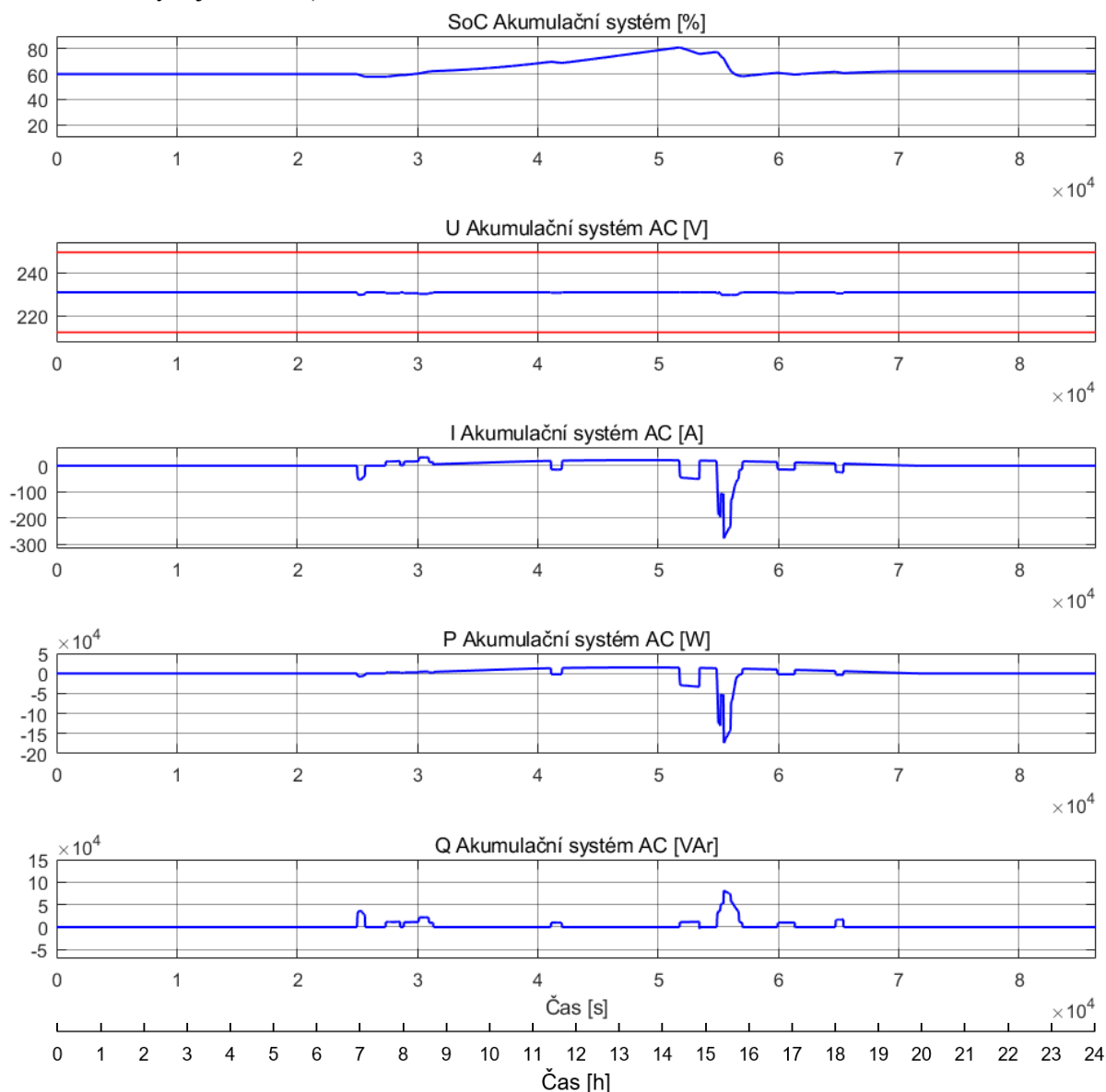
V počátečním roce sledovaného období nebude tato dobíjecí stanice ještě příliš využívána. Dle středního scénáře rozvoje elektromobility by se zde mohlo denně nabíjet 11 elektromobilů. Při testovaných variantách rozložení dobíjení v tomto roce se dobíjely souběžně maximálně 4 elektromobily. Následující obrázek prezentuje součtový odběr elektrické energie ze všech dobíjecích stanic.



Obr. 4-14 Průběhy veličin na vývodu k dobíjecím stanicím – 2020

První průběh zobrazuje efektivní hodnotu fázového napětí v dobíjecí stanici (včetně mezí  $\pm 8\%$  jmenovitého napětí při kterých by akumulátor začal regulovat napětí v předacím místě). Dále je zde průběh efektivní hodnoty odebíraného proudu a třífázového činného a jalového výkonu. Při této variantě bylo dosaženo nejvyššího soudobého příkonu, když se současně nabíjely tři elektromobily. Přibližně v 15 hodin a 30 minut (55 500 s) zde došlo k výrazné špičce odebíraného výkonu, která dosahovala 326 kW. Změřený čtvrt hodinový příkon celé dobíjecí stanice byl 232 kW. Minimálně na tuto hodnotu by musela být ujednána rezervovaná kapacita příkonu, která by se musela každý měsíc platit. Pokud by se provozovatel dobíjecí stanice chtěl pojistit, že tuto hodnotu nepřekročí (bez omezování výkonu dobíjení), a tím nebude muset platit vysoké poplatky za překročení rezervovaného příkonu, musel by k této úrovni přičíst určitou ochrannou mez o kterou by si navýšil stálé měsíční platby.

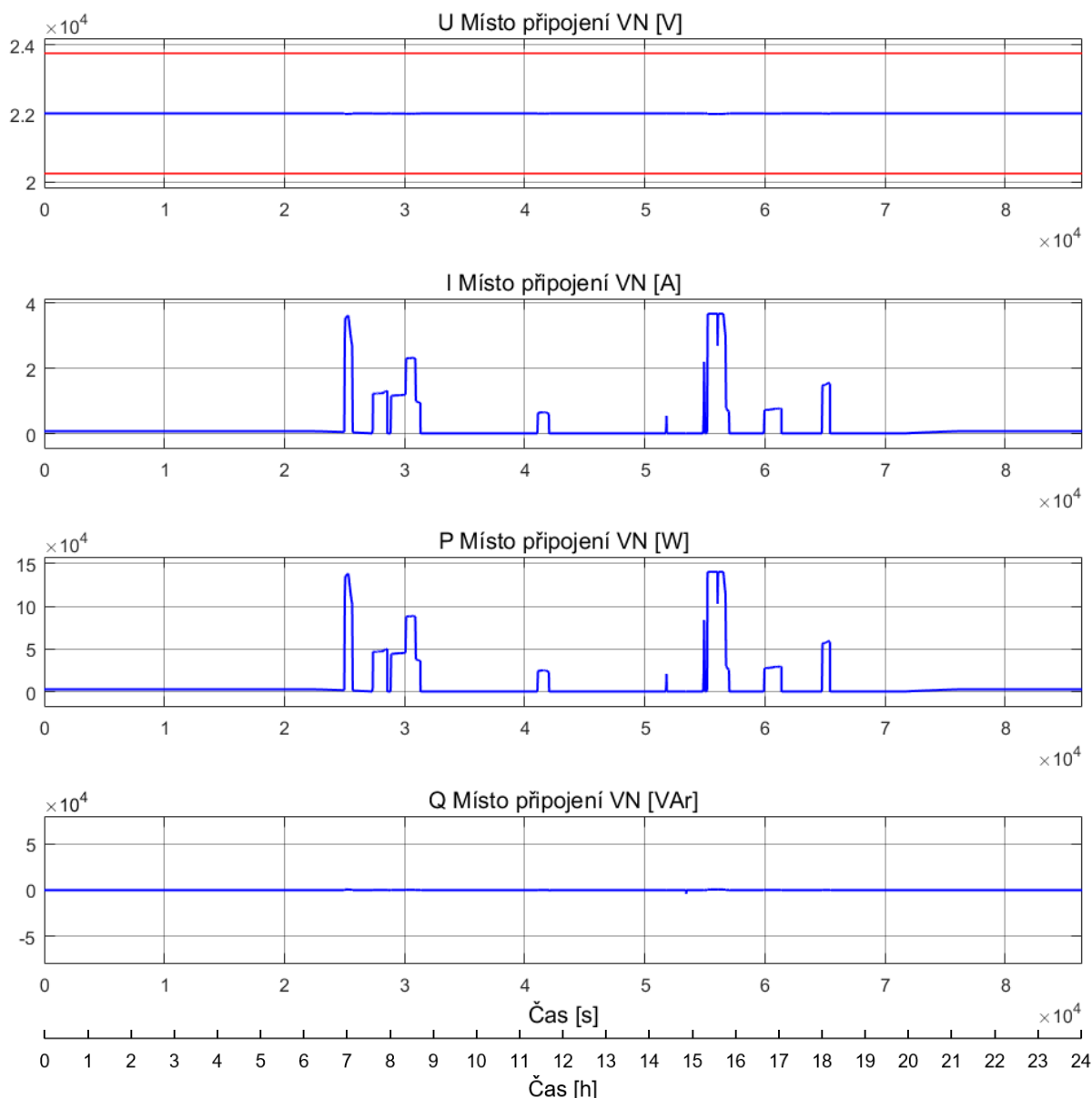
Způsobem, kterým lze omezit velikost potřebné rezervované kapacity příkonu, je využití lokálního akumulčního systému. Díky uložené elektrické energii v akumulátoru lze kompenzovat vysoké odběrové špičky výkonu a tím mimo jiné omezit zpětný vliv dobíjecí stanice na distribuční soustavu. Pro tento rok je počítáno s kapacitou akumulátoru 304 kWh a výkonem 240 kW, jak vyšlo dříve v optimálním ekonomicko-technickém návrhu uspořádání. Jednotlivé průběhy níže, jsou pro akumulční systém na střídavé straně měniče (součet všech měničů připojených k jednotlivým akumulátorovým jednotkám).



Obr. 4-15 Průběhy veličin na AC straně měniče akumulčního systému – 2020

První z průběhů ukazuje stav nabití akumulátoru, který se musí pohybovat mezi 10-90 %. V tomto roce se jako ideální jeví nastavení ustálených mezí stavu nabití mezi 50-70 %. Spodní mez je z důvodu zajištění určité elektrické energie pro dodávku v případě špičkového odběru dobíjecími stojany (nebo při podpětí). Horní mez je z důvodu zachování volné kapacity pro ukládání elektrické energie z fotovoltaické elektrárny (nebo při přepětí). Vidíme, že tento simulovaný letní den se akumulátor nabil energií z FVE z počáteční úrovně 60 % na přibližně 80 %. Jelikož stav nabití akumulátoru díky energii z FVE přesáhl nastavenou maximální ustálenou mez, jakmile se začal nabíjet první elektromobil, došlo k vybíjení akumulátoru a následně ještě k výraznějšímu vybíjení, protože probíhala kompenzace velkého odběru z dobíjecích stanic, který přesáhl rezervovaný příkon. V posledním grafu je patrný odběr jalového induktivního výkonu, který kompenzuje kapacitní jalový výkon produkovaný dobíjecími stojany při dobíjení elektromobilů. S ohledem na kapacitu akumulátoru by kompenzace výkonu dobíjení elektromobilů mohla probíhat klidně delší dobu.

Dostatečná rezervovaná kapacita příkonu z distribuční soustavy byla pro tuto variantu určena na úroveň 140 kW. Následující průběhy jsou z měření v místě připojení k distribuční soustavě (sdružené napětí 22 kV).

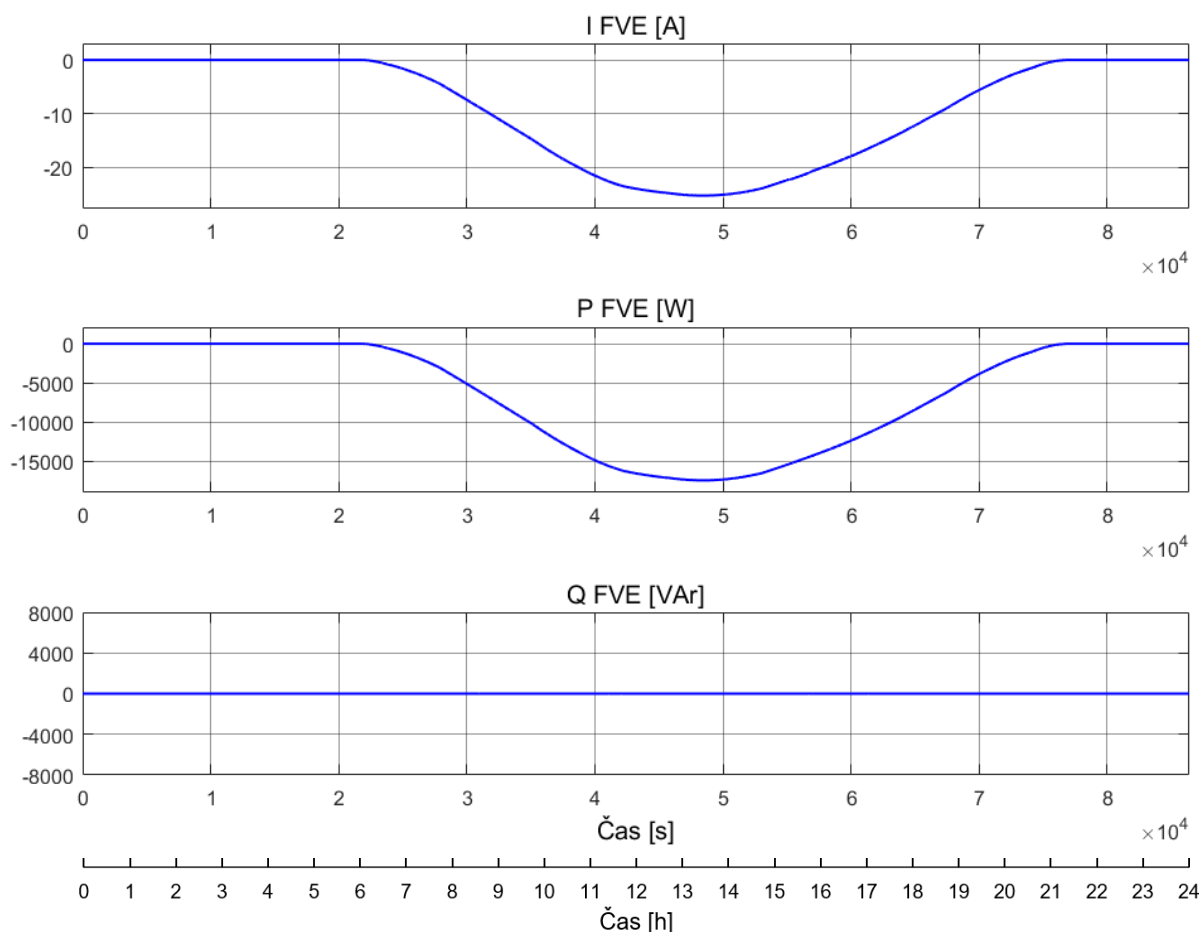


Obr. 4-16 Průběhy veličin v místě připojení k DS – 2020



Na průběhu proudu a činného příkonu je patrná funkce omezení odběru z distribuční soustavy v době nejvyšší špičky příkonu dobíjecích stanou, na úroveň rezervovaného příkonu. Zbytek elektrické energie byl poskytnut akumulacním systémem. Také je zde zřejmé vynulování příkonu způsobeného vlastní spotřebou dobíjecí stanice v době, kdy fotovoltaická elektrárna dodává elektrickou energii. Jelikož byl akumulátor nabit nad maximální udržovací mez, došlo téměř k plnému vykompenzování odběru elektrické energie pro dobíjení elektromobilu po 14. hodině (51 000 s), kde je viditelný pouze nepatrný odběr daný zpožděným zareagováním řídicího systému a měničů. Na posledním grafu je patrná funkce kompenzace jalového výkonu akumulátorem na nulovou hodnotu (účinník roven 1).

Ve všech následujících simulacích je uvažována generace elektrické energie fotovoltaickou elektrárnou shodná, proto bude průběh z měření na výstupu ze střídačů uveden pouze jednou. Podkladová křivka výroby elektrické energie je uvažována pro letní den, účinnost systému byla nastavena tak, aby denní produkce el. energie odpovídala získané hodnotě 147 kWh, blíže popsané v kapitole věnované návrhu fotovoltaické elektrárny. Řízení střídačů je uvažováno na účinník roven jedné.



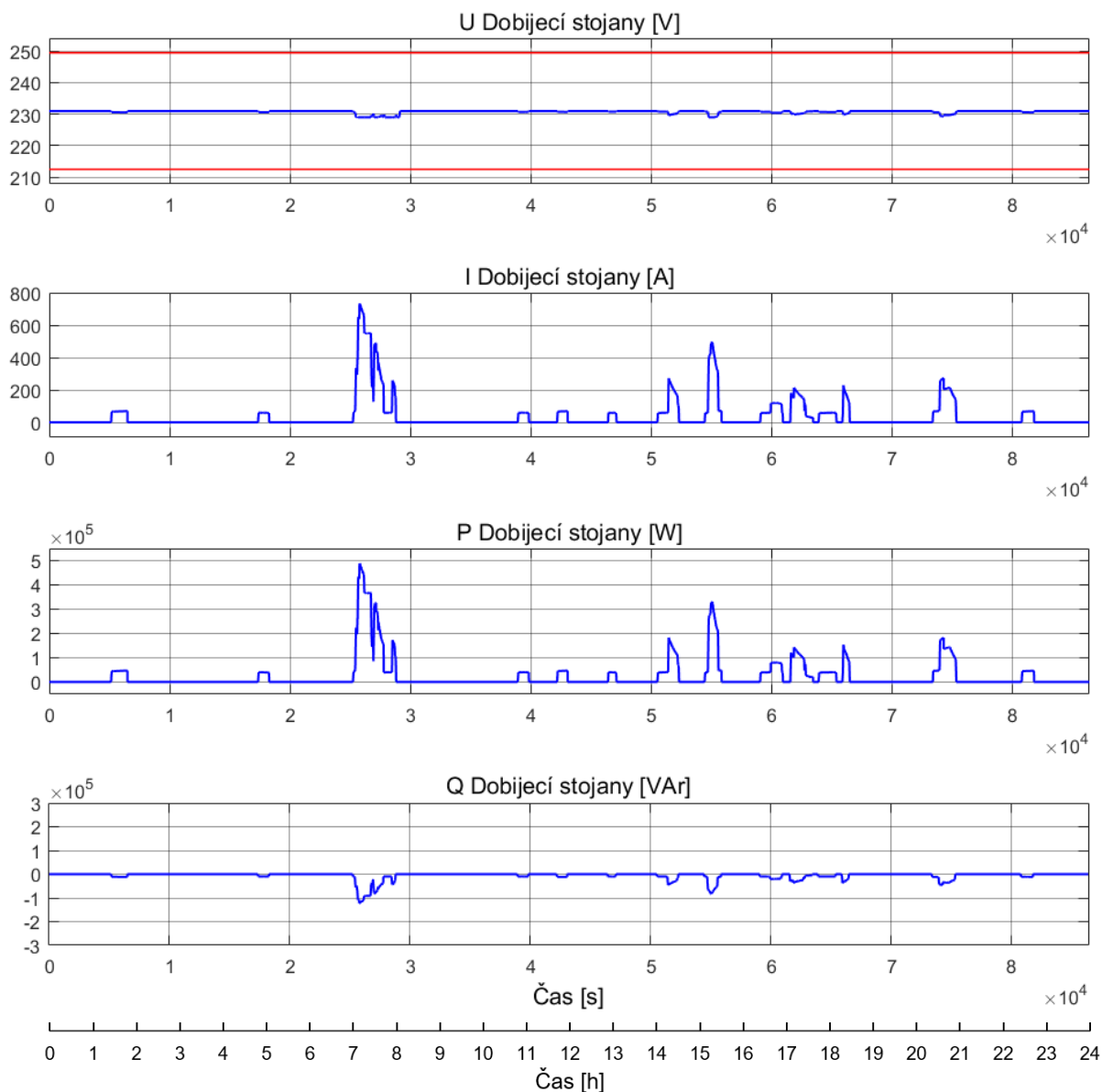
Obr. 4-17 Průběhy veličin na AC straně střídače FVE

Vlastní spotřeba je simulována průměrným konstantním odběrem 2 kW, proto nemá smysl zde zobrazovat změřené průběhy.

Využitím simulace s nastavenými parametry určenými pro optimální ekonomicko-technické uspořádání proběhlo ověření, že navrhovaný systém v tomto roce může bez výrazných problémů fungovat.

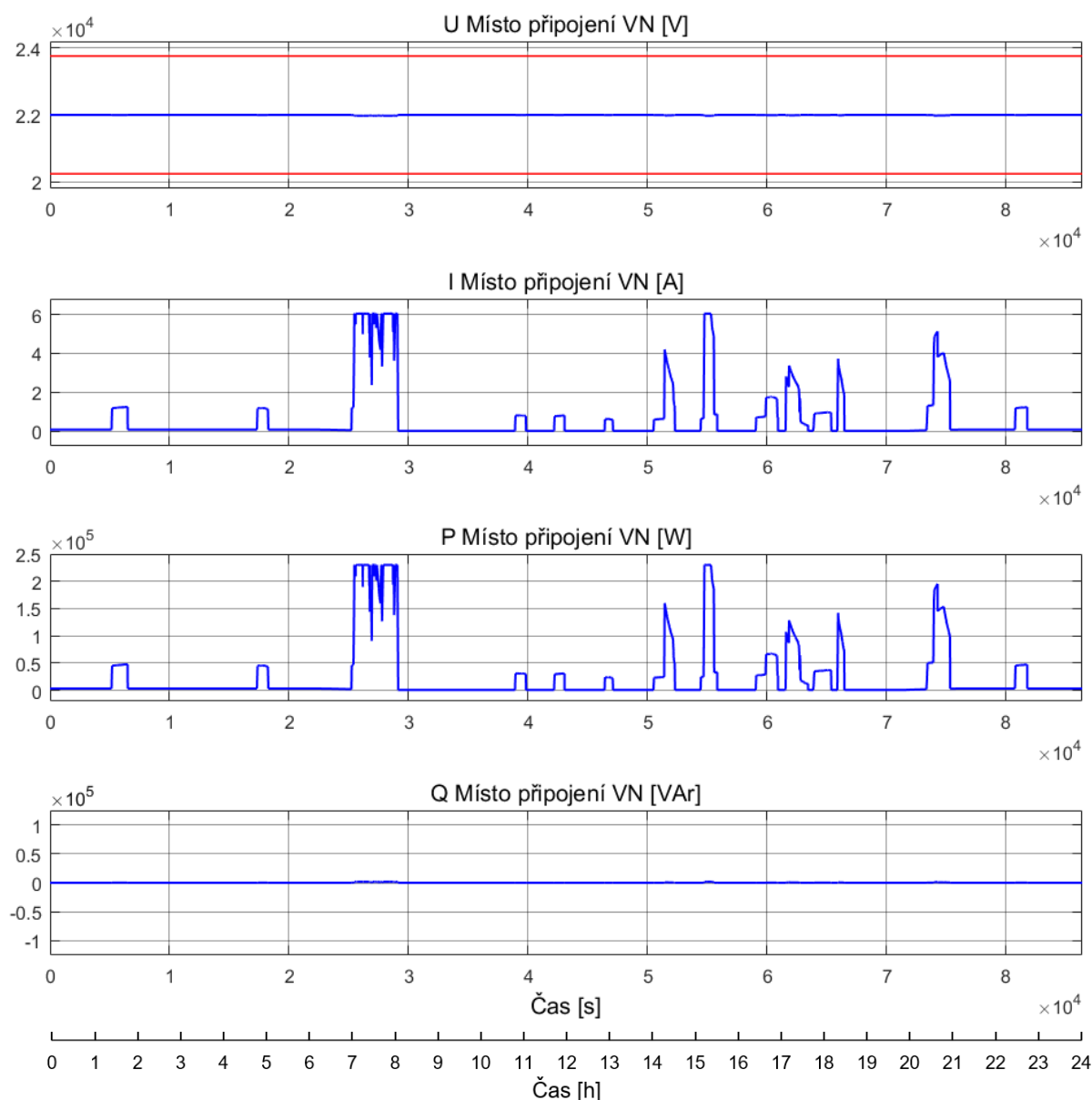
**Rok 2025**

V tomto roce se počítá s nabíjením 29 elektromobilů denně na této dobíjecí stanici. V následujícím grafu jsou opět zobrazeny součtové průběhy na vývodu ke všem dobíjecím stojanům. Ve vybrané variantě s nejvyšším odebraným výkonem pro toto období, nastala špička příkonu dobíjecích stojanů naopak v ranních hodinách (po 7. hodině) při zvýšené intenzitě dopravy. Příkon v této době dosáhl až 489 kW a probíhalo současné nabíjení 6 elektromobilů. Průměrný denní odběr elektrické energie pro dobíjení elektromobilů činil 583 kWh.



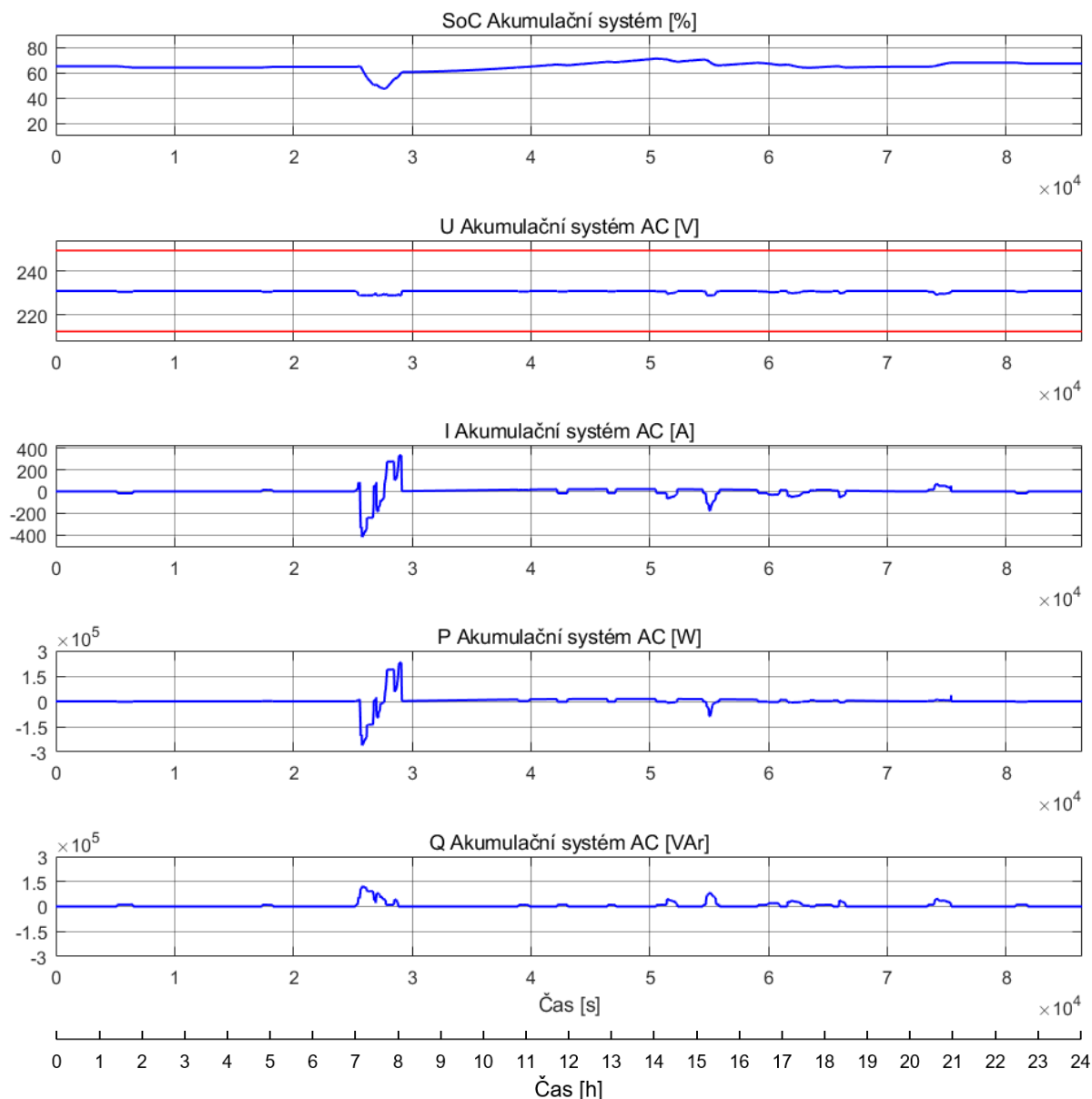
Obr. 4-18 Průběhy veličin na vývodu k dobíjecím stojanům – 2025

Navržená hodnota rezervované kapacity příkonu pro tento rok vyšla 230 kW. Zbytek výkonu zajistí akumulací systém. Na následujících grafech je patrné snížení odebíraného příkonu z distribuční soustavy na maximální velikost rezervovaného příkonu v době ranní špičky a také jedné menší odběrové špičky výkonu v odpoledních hodinách. Opět proběhlo plné vykompenzování kapacitního jalového výkonu z dobíjecích stanic, aby neprobíhala nedovolená dodávka jalového výkonu do distribuční sítě. Malý odběr jalového výkonu ze sítě je povolen při dodržení účinníku v rozmezí 0,95-1. V této dobíjecí stanici způsobují nepatrný odběr jalového výkonu nedokonale vykompenzované jalové ztráty transformátoru naprázdno. Konkrétně v této simulaci neklesl čtvrt hodinový účinník pod 0,997 a na podobných hodnotách je udržován ve všech ostatních simulacích.



Obr. 4-19 Průběhy veličin v místě připojení k DS – 2025

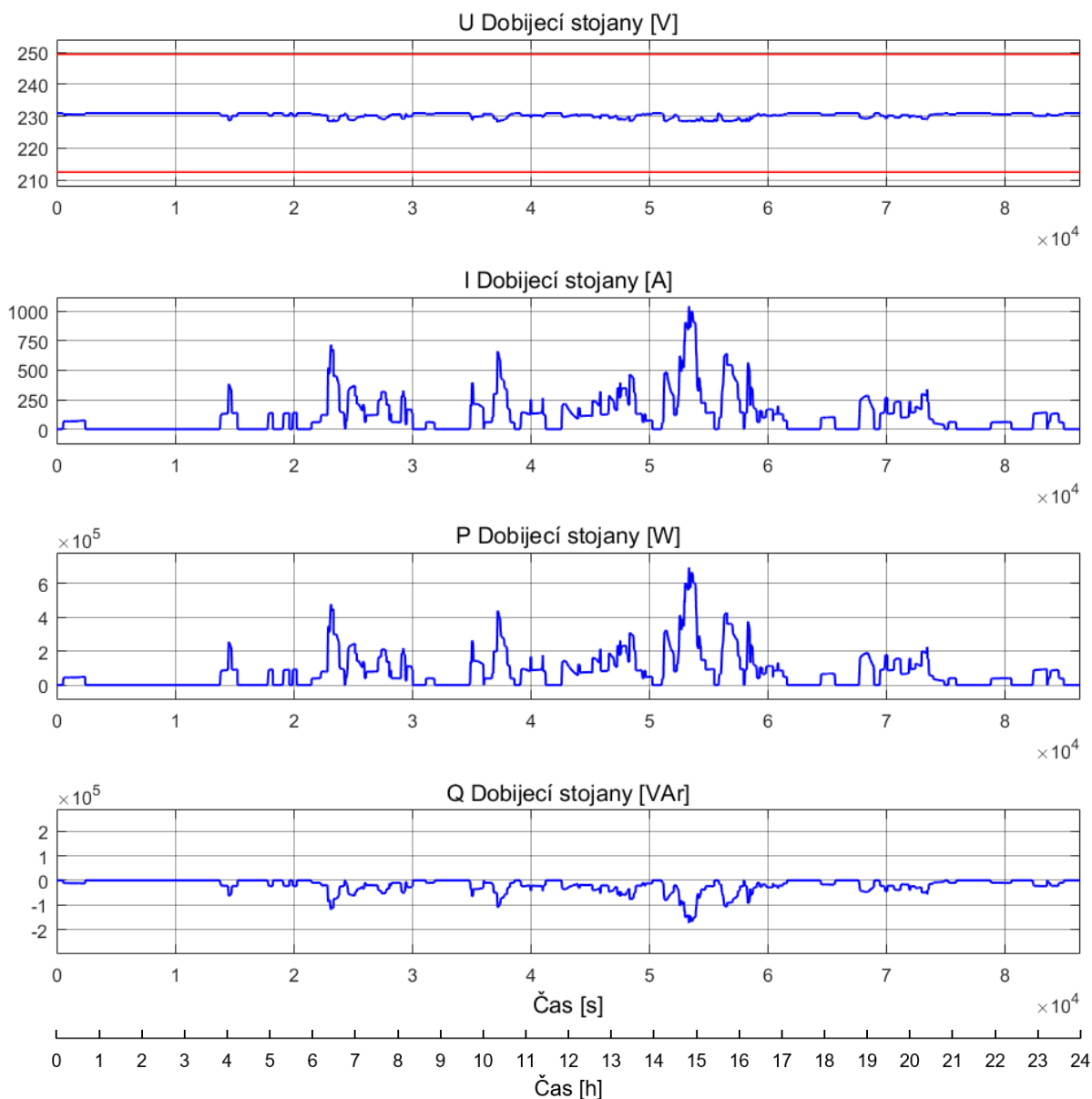
Grafy níže reprezentují měření na výstupu z akumulčního systému. Pro tento rok je počítáno s kapacitou akumulátoru 456 kWh a výkonem 360 kW. Díky vyšší kapacitě akumulátoru lze mírně zvednout nastavení ustálených mezí, protože fotovoltaická elektrárna může akumulátor nabít o nižší procentuální hodnotu. Minimální ustálená mez je stanovena konkrétně na 55 % a maximální na 75 % stavu nabití akumulátoru. V nastaveném rozmezí SoC by se stav nabití akumulátoru měl po většinu času udržovat. Ze získaných průběhů je patrné, že se stav nabití akumulátoru téměř celý den v daném intervalu pohyboval, pouze při kompenzaci velkého odběru elektrické energie při ranní výkonové špičce klesl stav nabití mírně pod 50 %.



Obr. 4-20 Průběhy veličin na AC straně měniče akumulčního systému – 2025

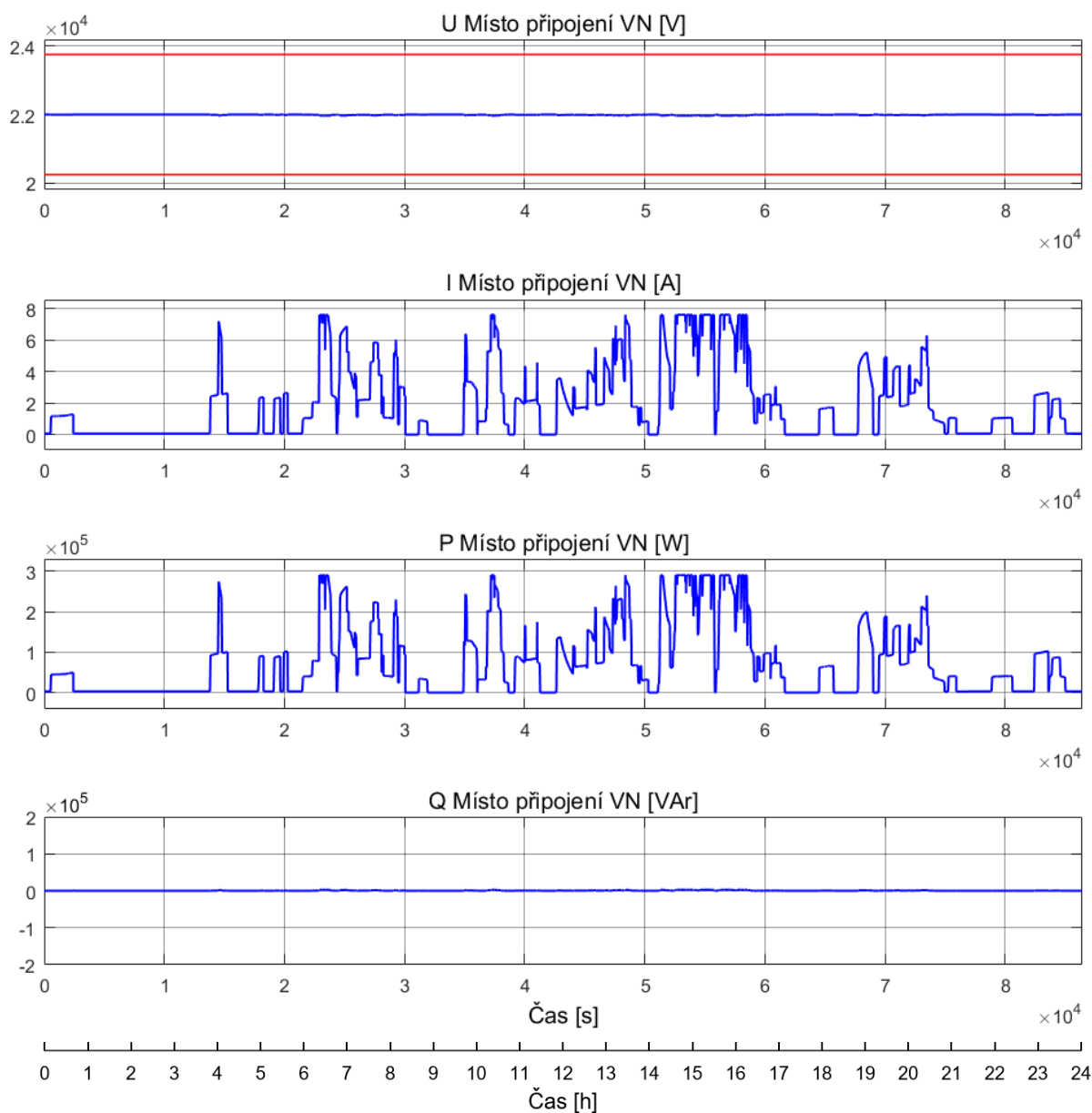
**Rok 2030**

V roce 2030 je očekáván požadavek na dobíjení 87 elektromobilů denně. Maximální příkon dobíjecích stanic v tomto scénáři dosáhl téměř 700 kW. V tento okamžik se souběžně dobíjelo 9 vozidel. Toto odběrové maximum nastalo před třetí hodinou odpoledne (53 300 s), při zvýšené intenzitě dopravy, kdy se lidé vrací domů z práce. Ani zde není, až na několik krátkodobých přesahů, dlouhodobé zatížení, které by přetrvávalo zhruba nad 50 % špičkového příkonu. Opět lze s výhodou využít akumulační systém a snížit potřebný příkon z elektrizační soustavy. V tomto roce činil průměrný denní odběr elektrické energie 1,8 MWh.



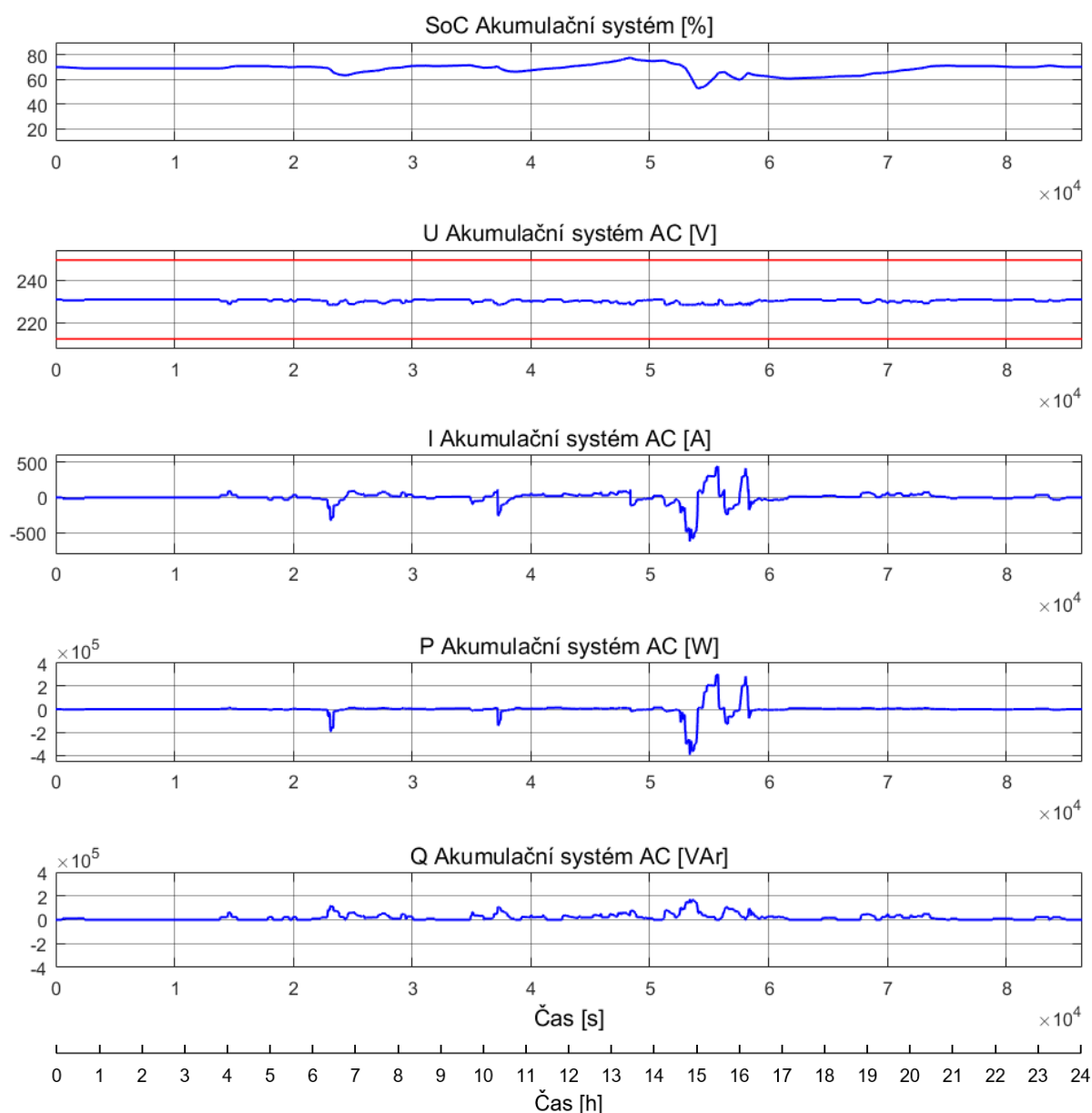
Obr. 4-21 Průběhy veličin na vývodu k dobíjecím stanicím – 2030

Vhodná rezervovaná kapacita příkonu pro tento případ byla stanovena na úroveň 290 kW. Oproti původnímu uspořádání bez akumulátorů, kdy čtvrt hodinový příkon dosahoval hodnoty 621 kW, je možné snížení rezervovaného příkonu o více než 50 %. Změřené průběhy v místě připojení dobíjecí stanice k distribuční soustavě jsou i pro tento rok uvedeny na grafu níže. Zde si lze všimnout, že poté co se omezí nejvyšší odebíraný výkon dobíjecími stojany po 15. hodině (54 000 s), setrvá velikost příkonu odebíraného z distribuční soustavy těsně pod rezervovaným příkonem delší dobu. To je způsobeno zpětným nabíjením akumulátoru v případě, kdy stav nabití klesne pod minimální ustálenou úroveň. Vhodným řízením akumulačního systému, který se v tomto okamžiku (respektive vždy) může nabíjet maximálně velikostí výkonu odpovídajícímu rozdílu mezi rezervovaným příkonem z distribuční soustavy a odebíraným výkonem v dobíjecí stanici (se započítáním výkonu FVE), lze zajistit okamžitou opětovnou akumulaci elektrické energie, která může být následně využita pro kompenzaci dalších velkých odběrů.



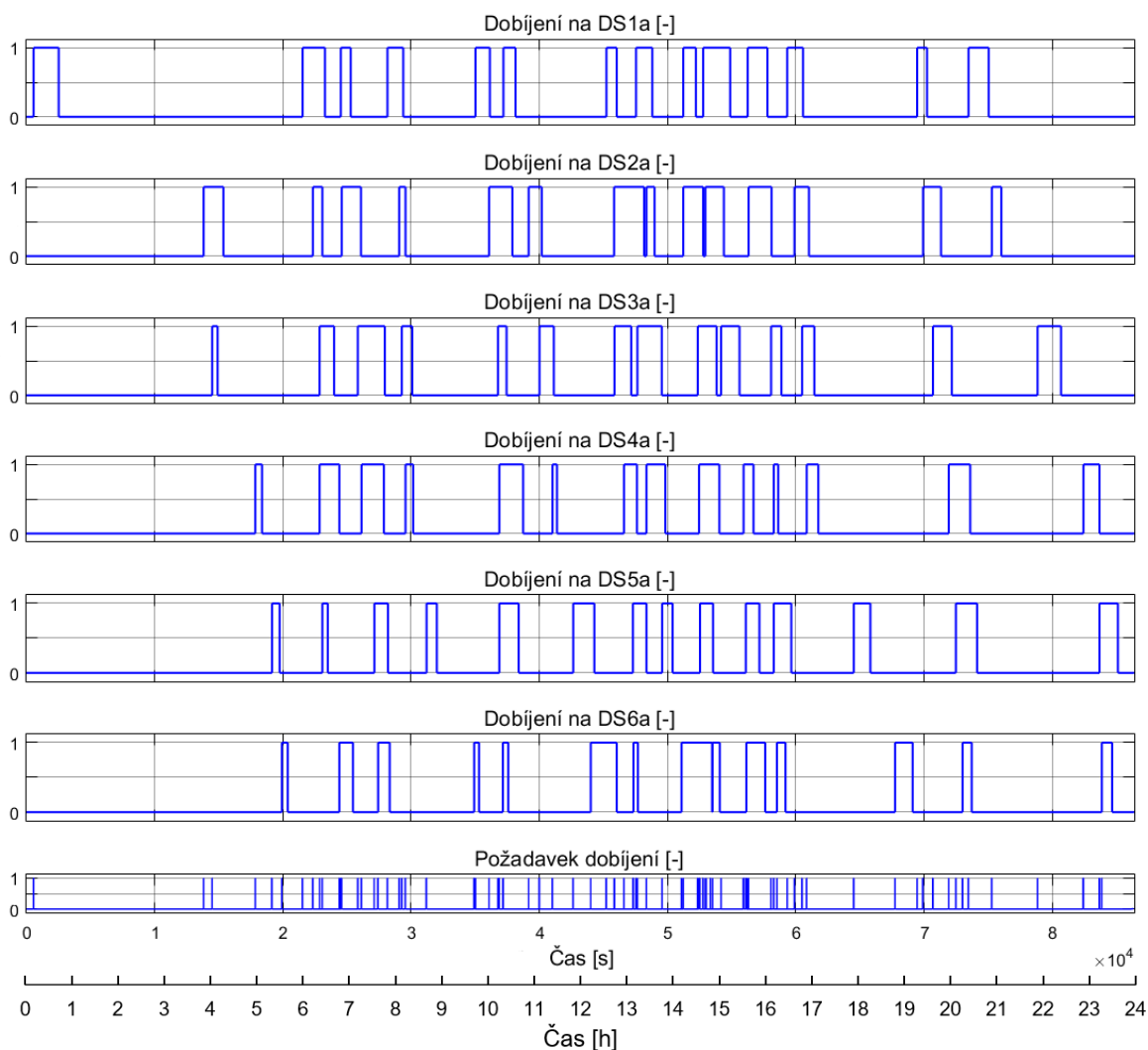
Obr. 4-22 Průběhy veličin v místě připojení k DS – 2030

K tomuto roku je počítáno s instalovaným výkonem akumulčního systému 480 kW a kapacitou 608 kWh. Opět doporučuji navýšení udržovacích úrovní stavu nabití o 5 %. FVE je schopna nabít zvýšenou kapacitu akumulátoru o nižší procentuální hodnotu a zároveň díky zvýšené intenzitě využívání dobíjecí stanice může být daleko více elektrické energie z FVE přímo využito pro dobíjení elektromobilů, bez „meziakumulace“ do lokálního akumulčního systému. Spodní ustálená mez byla tedy nastavena na 60 % a horní mez na 80 %. Opět došlo během dne pouze na krátkou chvíli k poklesu pod nastavenou spodní úroveň v okamžiku kompenzace velkého odběru elektrické energie dobíjecími stojany. Ani během této simulace nebyl akumulátor podnícen k výraznému cyklování, resp. vybíjení v řádu desítek procent na nízké úrovni SoC a zpětnému nabíjení.



Obr. 4-23 Průběhy veličin na AC straně měniče akumulčního systému – 2030

Následující obrázek ukazuje časové rozložení nabíjení na jednotlivých dobíjecích stojanech pro první dobíjecí kabel (DS1a-DS6a). Na druhých dobíjecích bodech jednotlivých stajánů se nabíjely během dne pouze tři elektromobily, a to v době nejvyššího zatížení. Průměrná doba dobíjení v tomto případě byla 16,5 minut s průměrným odběrem 20,7 kWh.

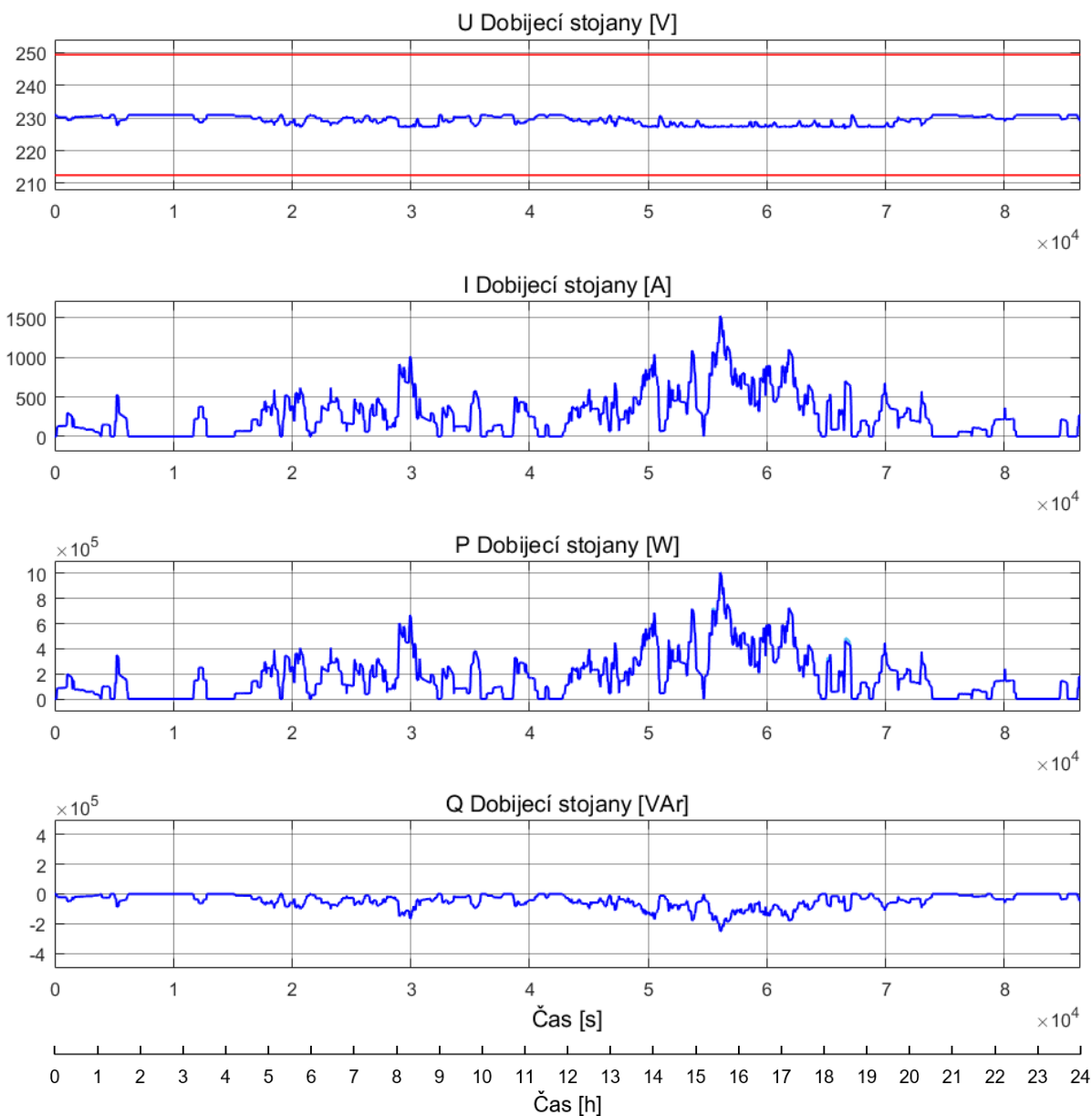


Obr. 4-24 Časové rozložení dobíjení na jednotlivých dobíjecích stojanech (dobíjecí bod „a“) – 2030



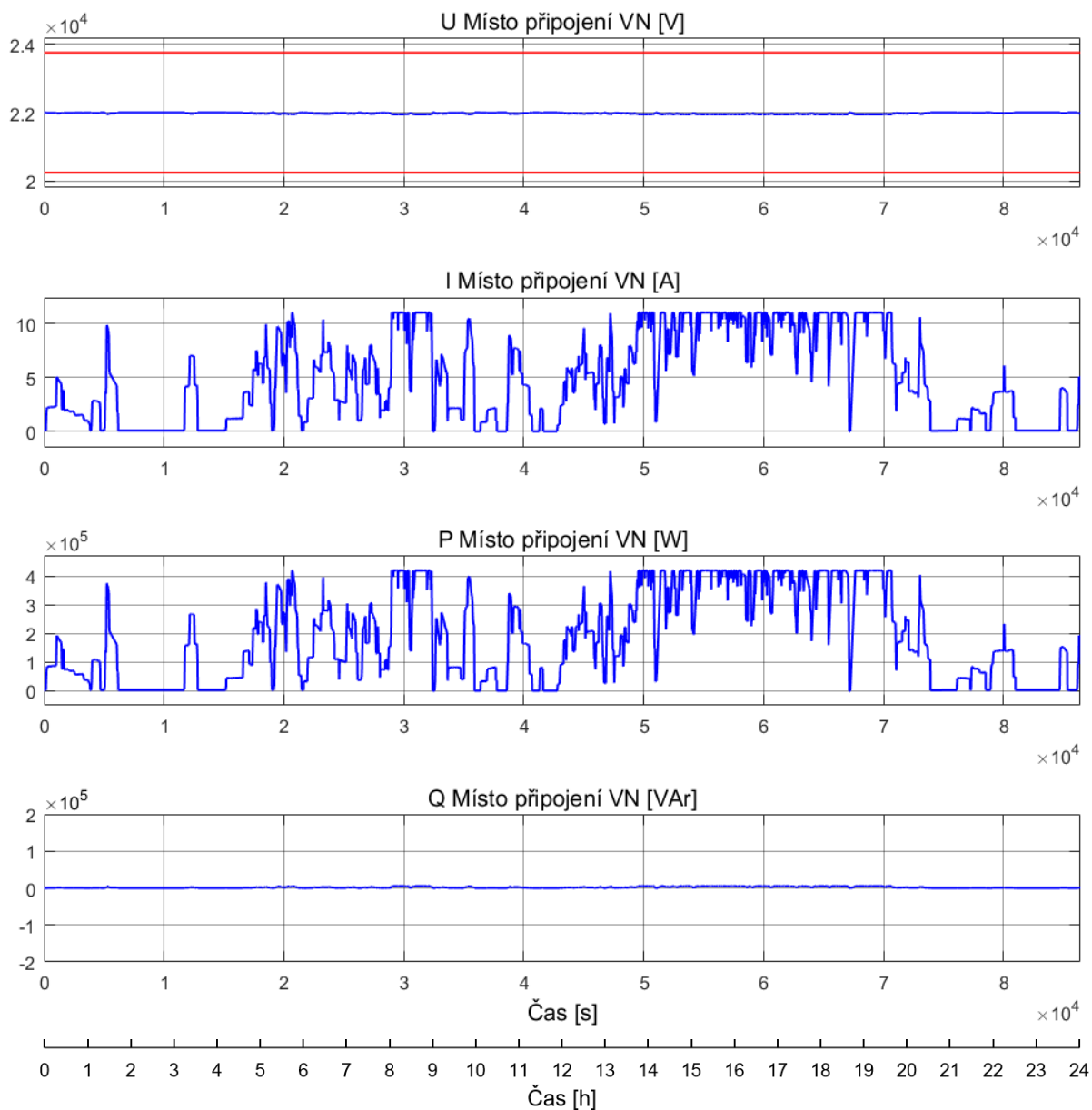
**Rok 2035**

Pro tento rok je simulace vytvořena pro 184 elektromobilů, které se nabíjejí na této dobíjecí stanici. Maximální soudobý výkon dobíjecích stojanů již těsně přesáhl 1 MW. Během nevyššího zatížení se souběžně nabíjelo již na všech 12 dobíjecích bodech, ale dlouhé fronty čekajících vozidel se netvořily, vždy čekal ve frontě max. jeden elektromobil. Konkrétně v této simulaci nemohla být během dne obsluhována ihned po příjezdu dvě vozidla a čekala maximálně tři minuty, než se uvolnilo místo u některého dobíjecího stojanu. Denní odběr el. energie dobíjecími stojany se pohyboval na úrovni 4,2 MWh.



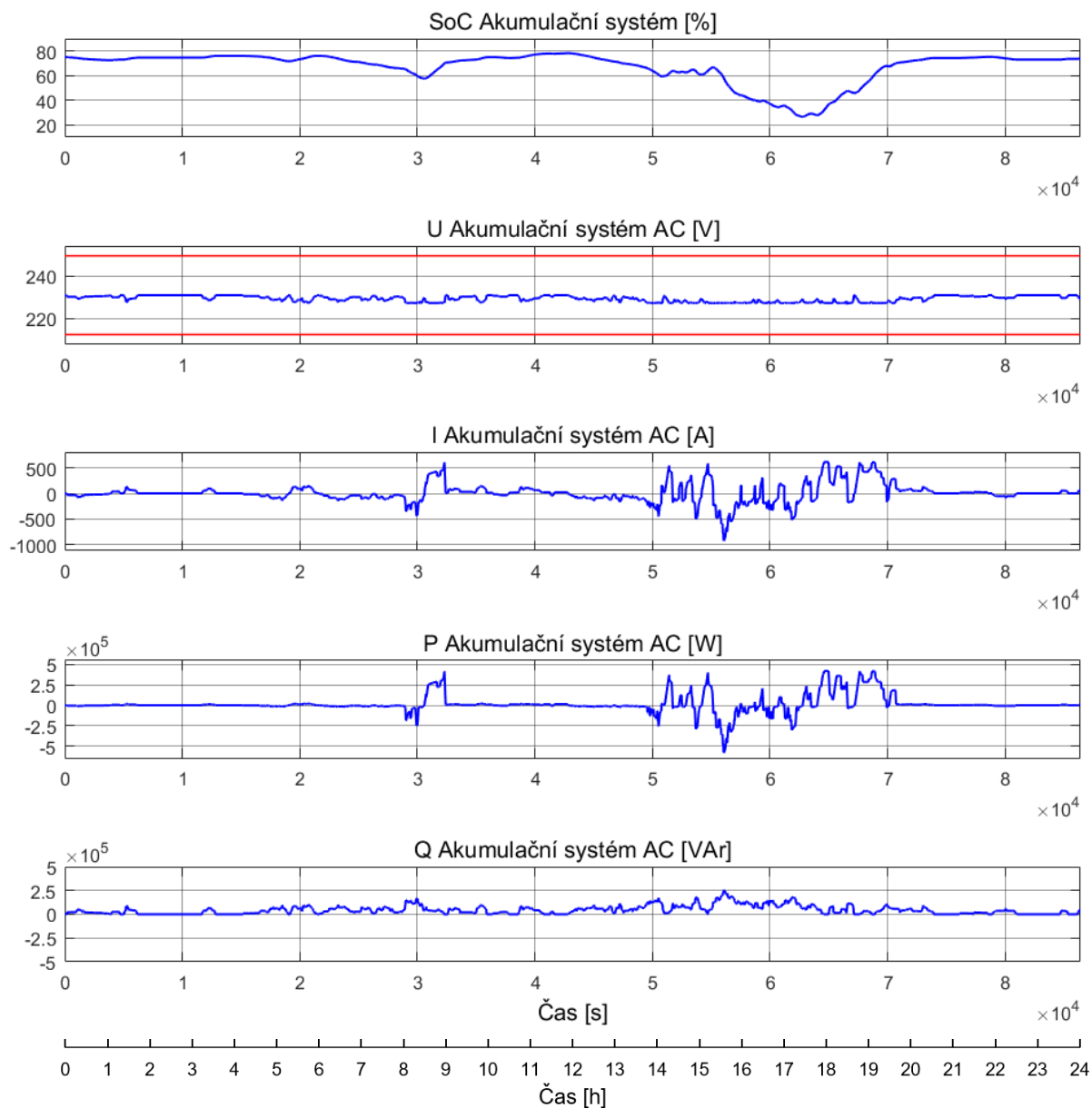
Obr. 4-25 Průběhy veličin na vývodu k dobíjecím stojanům – 2035

Rezervovaná kapacita příkonu pro tento rok by měla postačovat 420 kW. Tento příkon byl překročen na poměrně dlouhou dobu, v řádu jednotek hodin, s výjimkou krátkých poklesů, v rámci odpoledního zvýšeného zatížení.



Obr. 4-26 Průběhy veličin v místě připojení k DS – 2035

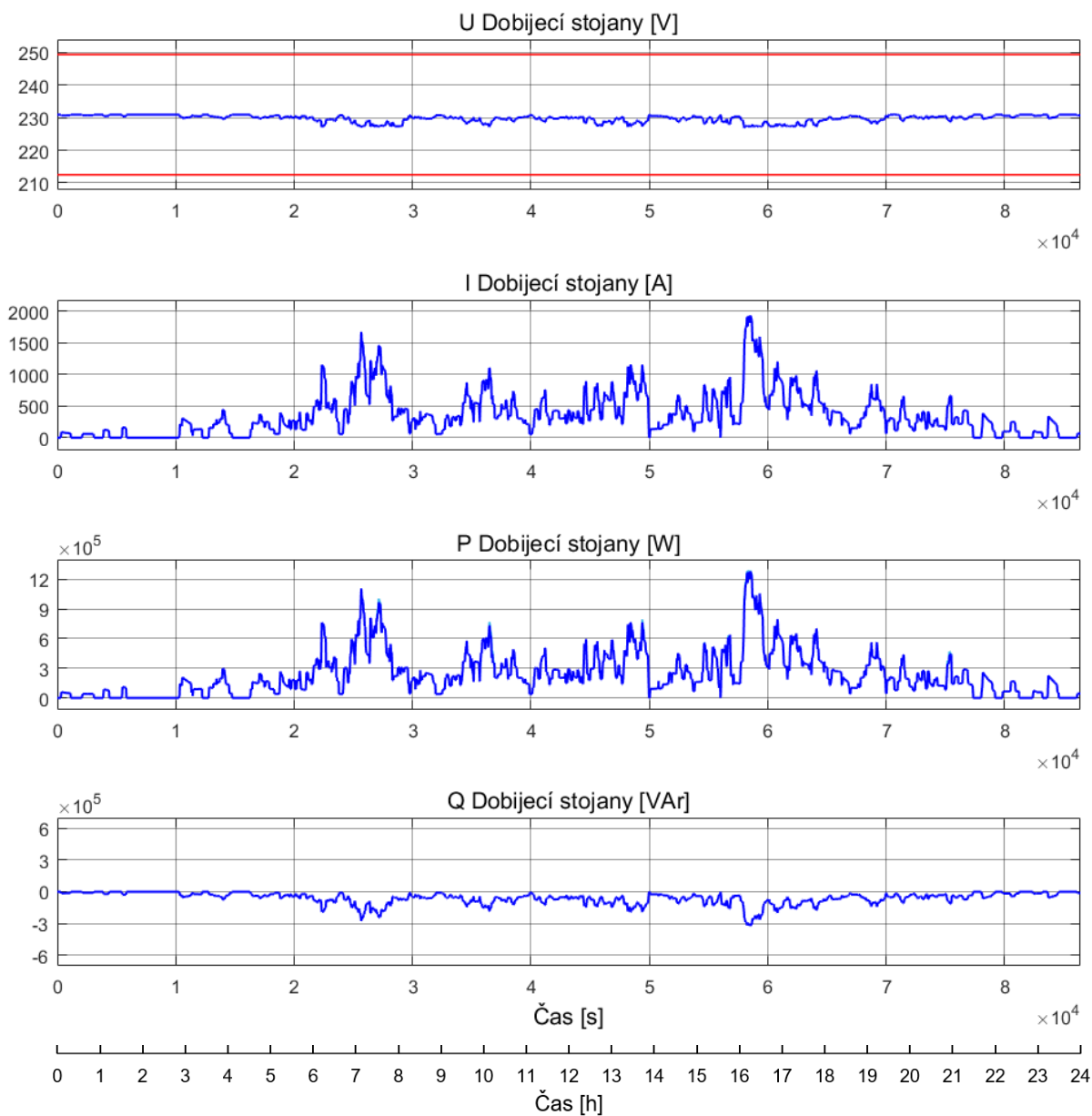
Výkon akumulčního systému byl navýšen na 720 kW a kapacita na 912 kWh. Trend posunu ustálených úrovní byl zachován i v tomto roce. Minimální nastavená ustálená hodnota stavu nabití akumulátoru má hodnotu 65 % a maximální 85 %. V tomto období byl akumulátor již výrazněji využíván. Vlivem dlouhodobé kompenzace velkého odběru se vybil téměř k 25 % SoC. Následně se akumulátor nabil zpět energií ze sítě, aby byl v plné pohotovosti pro případnou další dodávku výkonu v okamžiku velkého odběru dobíjecími stojany.



Obr. 4-27 Průběhy veličin na AC straně měniče akumulčního systému – 2035

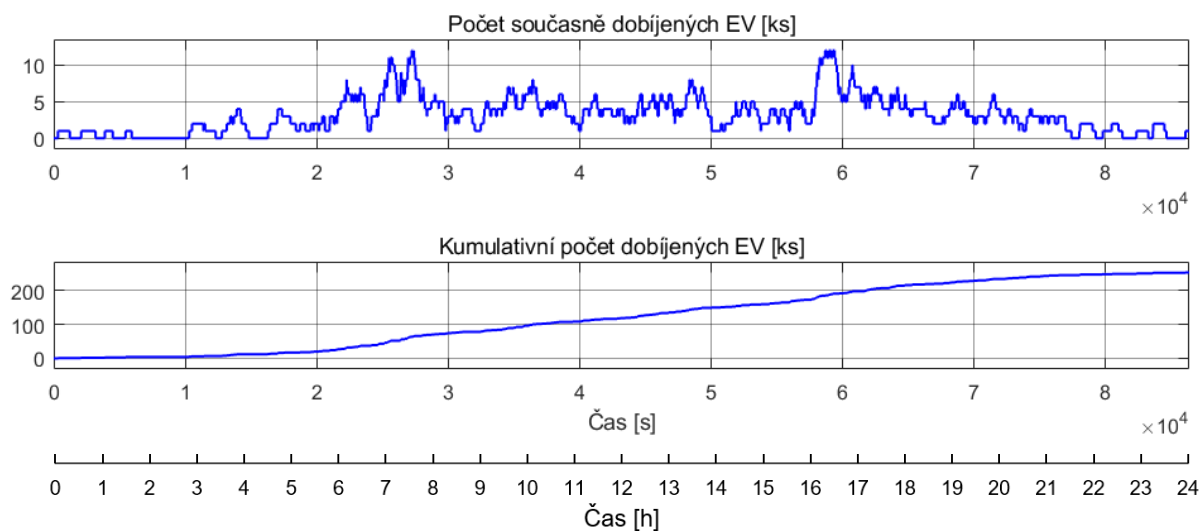
**Rok 2040**

Poslední sledovaný rok počítá s dobíjením až 252 elektromobilů denně. Z následujícího grafu jsou patrné dvě výkonové špičky odběru. První je po 7. hodině ráno (25 600 s) a druhá výraznější po 16. hodině večer (58 000 s). Špičkový příkon, který v součtu odebírají dobíjecí stojany v této variantě dosahuje 1 300 kW. Odebraná energie elektromobily za den činí 5,7 MWh.



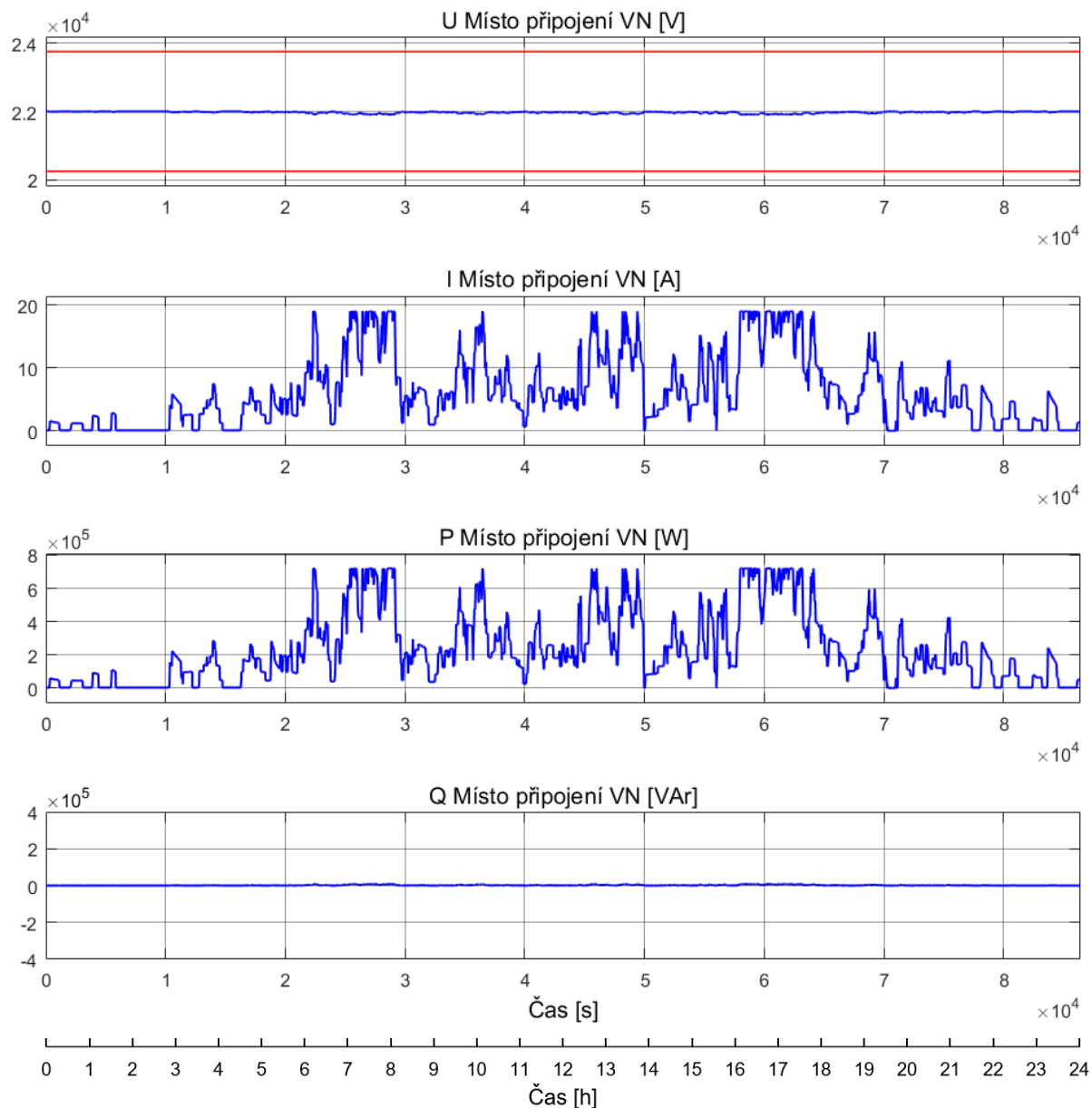
Obr. 4-28 Průběhy veličin na vývodu k dobíjecím stojanům – 2040

Dobíjecí stanice je schopna obsloužit i tento počet elektromobilů. V testovaných variantách již ale nastávaly případy, kdy se začínala tvořit fronta maximálně tří elektromobilů, které nemohly začít nabíjet okamžitě po příjezdu. Čekací doba byla maximálně čtyři minuty. Konkrétně v této variantě, která byla vybrána z důvodu nejvyššího výkonového zatížení, bylo téměř pokaždé možno začít nabíjet ihned po příjezdu, pouze jeden elektromobil musel čekat přibližně 3 minuty. Následující graf zobrazuje časové rozložení současně dobíjených elektromobilů. V již zmíněných časových okamžicích probíhalo souběžné nabíjení na všech dvanácti dobíjecích bodech této dobíjecí stanice.



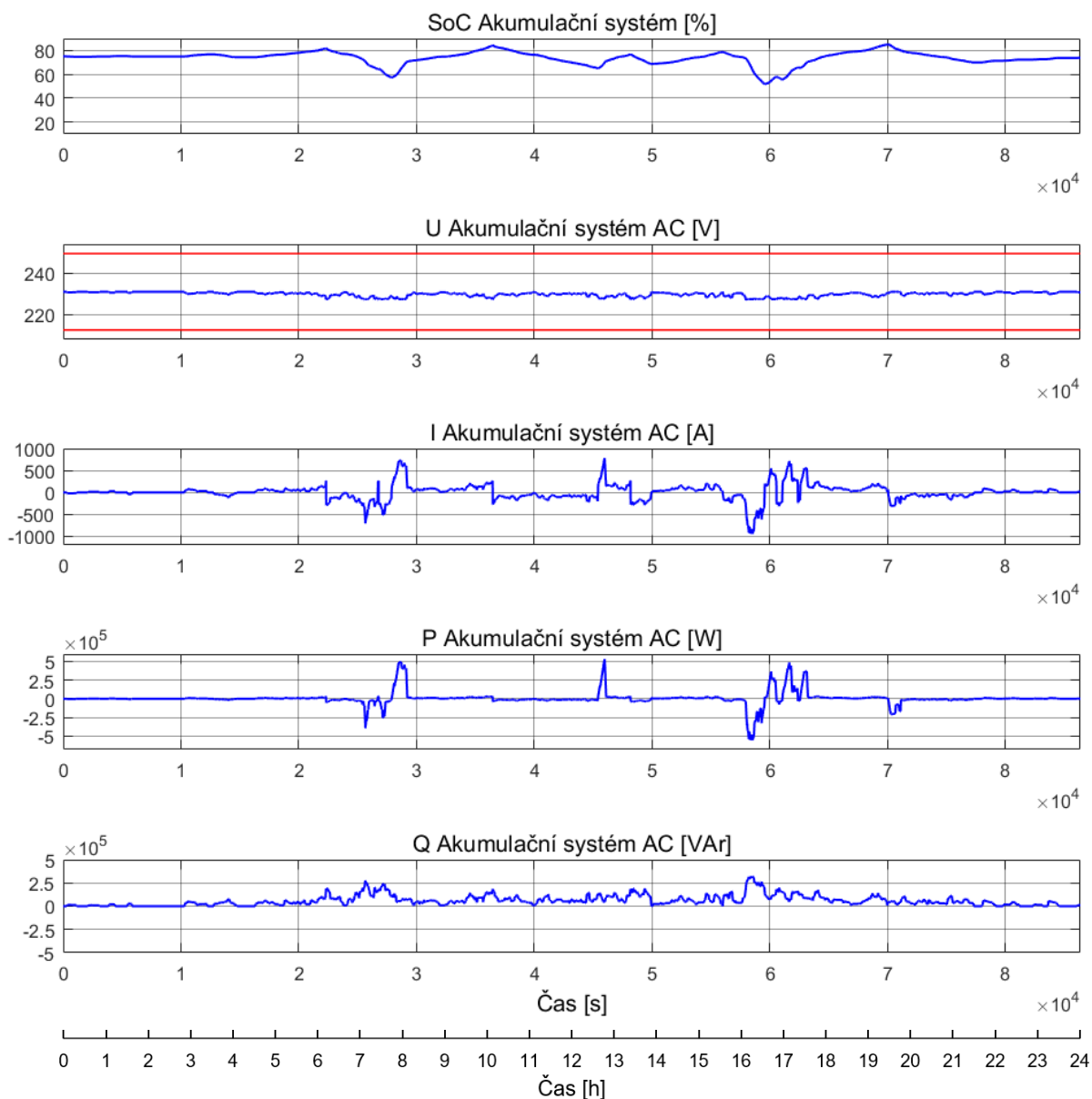
Obr. 4-29 Časové rozložení současně dobíjených EV a jejich kumulativní počet v rámci dne – 2040

Díky využití akumulátoru postačuje v tomto roce rezervovaná kapacita příkonu 720 kW. V roce 2037 musela být navýšena elektrická přípojka a byl přidán druhý transformátor s výkonem 630 kVA. Následující průběhy jsou z měření v místě připojení k distribuční soustavě. omezení odebíraného příkonu na hodnotu zmíněné rezervované kapacity probíhalo jak v rámci ranního zatížení, tak i odpoledne.



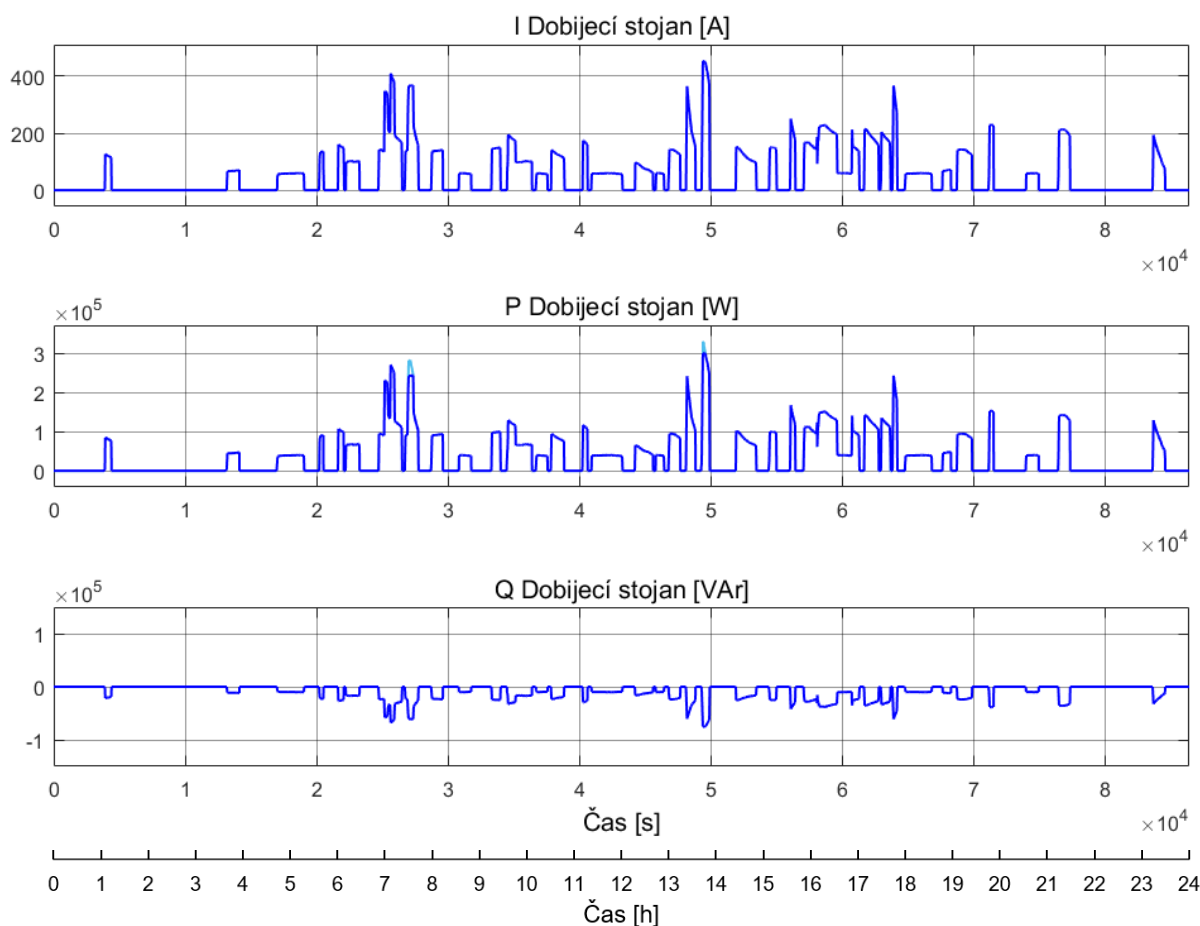
Obr. 4-30 Průběhy veličin v místě připojení k DS – 2040

Stejnou část výkonu, jako je velikost rezervované kapacity příkonu, je schopen dodat akumulční systém. Oproti roku 2035 nedošlo k rozšíření akumulčního systému, proto jsou hlídané úrovně stavu nabití zachovány shodně. Při první kompenzaci odebíraného výkonu se akumulátor vybil mírně pod 60 %. Po odeznění velkého odběru dobíjecími stojany se opět nabil na hodnotu z nastaveného intervalu.



Obr. 4-31 Průběhy veličin na AC straně měniče akumulčního systému – 2040

Navržené uspořádání je vytvořeno tak, aby na základě vytvořených simulací nemuselo docházet k omezování poskytovaného výkonu dobíjecími stojany. Následující průběhy proudu, činného a jalového výkonu jsou pro jeden konkrétní dobíjecí stojan. Jedná se o součet odběrů ze dvou dostupných nabíjecích kabelů. V určitých okamžicích jsou k tomuto dobíjecímu stojanu připojeny dva elektromobily. U činného výkonu jsou vždy zobrazovány dva průběhy, které se po většinu času překrývají. Spodní světle modrý průběh je teoretický výkon, který by elektromobil byl schopen v daný okamžik využít. Vrchní tmavě modrá křivka zobrazuje výkon, kterým se elektromobil skutečně dobíjí. Toto zobrazení slouží k ověřování, zda nedochází k omezování poskytovaného výkonu. V následujícím grafu pro činný výkon je patrné, že ve dvou případech by se elektromobil mohl nabíjet vyšším výkonem, ale dobíjecí stojan mu maximální hodnotu neposkytne. Omezování výkonu není z důvodu nedostatečného příkonu ze sítě (a z akumulátoru), ale z vlastního maximálního výkonu dobíjecího stojanu. První případ nastal v půl osmé ráno (27 000 s). Zde probíhalo současné dobíjení dvou elektromobilů. První elektromobil byl schopen dobíjení výkonem až 100 kW, ale z důvodu funkce dobíjecího stojanu, která byla popsána v kapitole věnované výběru dobíjecího stojanu, zabral dva výkonové moduly po 75 kW. Druhý elektromobil, který se začal nabíjet později, měl k dispozici již pouze zbylé dva moduly, tedy výkon 150 kW. Nicméně jinak by byl schopen nabíjení klidně výkonem 200 kW. Světlá špička, která na grafu prosvítá, tvoří právě 50 kW výkonu, který nebyl poskytnut pro nabíjení. Druhé omezení výkonu, kterého si lze povšimnout, nastalo před druhou hodinou odpoledne (49 500 s). Zde byl nabíjen pouze jeden elektromobil, nicméně byl to typ vozu, který lze dobíjet výkonem až 350 kW. Uvažovaná dobíjecí stanice ale poskytuje deklarovaný maximální výstupní výkon pouze 300 kW. Za příznivých podmínek by měla být schopna krátkodobě poskytnout i 350 kW, ale s tím není v simulaci počítáno, proto nastalo zobrazené omezení výkonu.



Obr. 4-32 Průběhy veličin u dobíjecího stojanu č. 3 – 2040



### **Shrnutí simulací**

S využitím simulací bylo ověřeno, že navrhované uspořádání je dostatečné na zajištění provozu dobíjecí stanice. Akumulační systém umožňuje omezení odběrových špiček a tím snížení rezervované kapacity příkonu z distribuční sítě. Ve všech testovaných rocích byla navržená kapacita akumulátoru dostatečná na poskytnutí potřebné energie pro dobíjení elektromobilů. Pouze v roce 2035 došlo v porovnání s ostatními roky k většímu vybití akumulátoru (SoC 25 %). To bylo způsobeno vlivem déletrvajících odběrů dobíjecími stojany nad úroveň rezervovaného příkonu. Bylo ověřeno, že v okamžiku, kdy se akumulátor vybití pod nastavenou minimální mez ustálení, dokáže využít volný dostupný příkon a poměrně rychle se dobít zpět na požadovanou úroveň, aby byl schopen opět pokrývat vysoké odběry dobíjecími stojany. Z důvodu blízkého připojení k distribuční soustavě nezpůsobovalo dobíjení elektromobilů výrazné úbytky napětí, ke kterým by jinak vlivem ztrát na vedení docházelo.

## Závěr

Trendem posledních let v automobilové dopravě je snaha o postupný přechod na alternativní pohony. V osobní automobilové dopravě jsou nejvíce preferovány elektromobility. Ačkoli rozvoj elektromobility v České republice nebyl doposud nijak výrazný, může se to velmi rychle změnit. Budování veřejné dobíjecí infrastruktury i samotné dobíjení elektromobilů s sebou nese zvýšené požadavky na robustnost elektrizační soustavy a na kvalitu dodávek elektrické energie. Obzvláště ultrarychlé dobíjení, které se projevuje nárazovými odběry vysokých výkonů, může být z tohoto hlediska problematické. Postupem času dojde k vyčerpání vhodných lokalit, na umístění vysokovýkonných dobíjecích stanic a budou vyžadovány drahé a časově náročné úpravy distribuční soustavy. Aby se tyto potřeby minimalizovaly, bude vhodné v rámci dobíjecí stanice instalovat také akumulární zařízení.

Navrhovaná dobíjecí stanice využívá lokální zdroj obnovitelné elektrické energie a akumulární systém. Na střeše dobíjecí stanice je počítáno s fotovoltaickou elektrárnou s instalovaným výkonem 33,3 kWp. Akumulární systém umí zastávat několik provozních režimů. Slouží pro ukládání generované elektrické energie z fotovoltaické elektrárny, aktivně kompenzuje jalový výkon na požadovaný účinník, udržuje napětí ve stanovených mezích, ale jeho hlavní funkce spočívá v eliminaci vysokých výkonových odběrů dobíjecími stojany. Díky tomu lze snížit velikost rezervovaného příkonu z distribuční soustavy (technické maximum) a také velikost rezervované kapacity příkonu (maximum čtvrt hodinového příkonu). Tím lze omezit investiční náklady do přípojky a také měsíční platby za rezervovanou kapacitu příkonu.

V první části této práce jsem popsal možné způsoby akumulace elektrické energie, z nichž jsem jako nejvhodnější vybral Li-ion akumulátor. Následně jsem shromáždil potřebné podklady, které posloužily jako vstupní parametry pro vytvoření simulace provozu ultrarychlé dobíjecí stanice s možností souběžného dobíjení několika vozidel. Na základě aktuálního stavu a predikcí budoucího vývoje počtu elektromobilů, jsem určil předpokládaný počet dobíjení v dané dobíjecí stanici, v rámci pětiletých režů v rozmezí let 2020–2040. Pomocí vytvořené simulace jsem získal příkon dobíjecí stanice v jednotlivých letech. Podle těchto hodnot jsem určil potřebnou velikost přípojky a rezervované kapacity příkonu. Ve výchozí variantě nebylo uvažováno s využitím akumulárního systému pro omezování odběrových špiček výkonu. Následně jsem ve druhé variantě navrhl optimální ekonomicko-technické uspořádání dobíjecí stanice, které spočívá v postupném rozšiřování akumulárního systému v návaznosti na postupný rozvoj elektromobility. Energie z akumulátorů je využívána na kompenzaci odběrových špiček. V první variantě by bylo nutné za sledované období instalovat tři transformátory 630 kVA a stejně tak navyšovat rezervovaný příkon z distribuční soustavy. V roce 2020 by byla potřebná rezervovaná kapacita příkonu 270 kW a v roce 2040 již 1 220 kW. Při využití akumulárního systému není nutné instalovat třetí transformátor a rezervovaná kapacita příkonu by oproti první variantě postačovala v průměru poloviční. V prvním roce by byla potřebná hodnota příkonu z distribuční sítě 140 kW a v posledním roce 720 kW. Shodný výkon by v roce 2040 mohl dodávat i akumulární systém a jeho kapacita by byla 912 kWh. Podrobněji jsou hodnoty pro jednotlivé časové řezy uvedeny v následující tabulce. První dva řádky ukazují získané hodnoty příkonu z provedené simulace dobíjení elektromobilů. Třetí řádek odpovídá výchozí variantě bez použití akumulárního systému pro omezování odběrových špiček. Poslední tři řádky jsou pro druhou variantu s využíváním akumulárního systému.

Rok	2020	2025	2030	2035	2040
Špičkový příkon dobíjecí stanice [kW]	332	500	714	1 047	1 343
Čtvrthodinový příkon dobíjecí stanice [kW]	232	321	621	842	1 057
Rezervovaná kapacita příkonu bez akumulace [kW]	270	370	720	970	1 220
Rezervovaná kapacita příkonu s akumulací [kW]	140	230	290	420	720
Výkon akumulačního systému [kW]	240	360	480	720	720
Kapacita akumulačního systému [kWh]	304	456	608	912	912

Následně jsem funkci navrženého uspořádání zpětně otestoval pomocí simulačního programu. Ověřil jsem, že navržená konfigurace je dostatečná na zajištění provozu dobíjecí stanice. S využitím akumulačního systému lze omezit odběrové špičky příkonu a snížit rezervovanou kapacitu příkonu z distribuční sítě. Ve všech časových řezech byla kapacita akumulátorů dostatečná na poskytnutí potřebné energie pro dobíjení elektromobilů v okamžiku omezeného odběru ze sítě. Pouze v roce 2035 došlo v porovnání s ostatními roky k většímu vybití akumulátoru (SoC 25 %), vlivem déletrvajícího odběru dobíjecími stojany nad mezí rezervovaného příkonu. Také jsem ověřil, že v okamžiku, kdy se akumulátor vybije pod nastavenou minimální mez ustálení, dokáže využít volný dostupný příkon a poměrně rychle se dobít zpět na požadovanou úroveň, aby byl schopen opět pokrývat vysoké odběry dobíjecími stojany.

Tyto dvě varianty byly ekonomicky porovnány. Díky snížení stálých měsíčních plateb za rezervovanou kapacitu příkonu, vyšla druhá varianta za sledované období výhodněji o 4 066 000 Kč. Eliminace odběrových špiček je tedy výhodná jak z pohledu provozovatele distribuční soustavy a nároků na ni, tak i z pohledu provozovatele dobíjecí stanice.

Dobíjecí stanice provozovaná s akumulačním systémem a ideálně doplněna i obnovitelným zdrojem elektrické energie má bezesporu přínosy, jak na kvalitu elektrické energie v distribuční soustavě, tak i ekonomické pro provozovatele dobíjecí stanice, oproti variantě bez akumulačního systému. Přínosy na kvalitu el. energie spočívají hlavně v eliminaci vysokých odběrových špiček výkonu dobíjecími stojany, kompenzaci jalového výkonu na požadovaný účiník a udržování napětí ve stanoveném rozmezí. Ekonomické přínosy pro provozovatele dobíjecí stanice se projeví během provozu, kdy díky snížení stálých měsíčních plateb za rezervovanou kapacitu příkonu a omezení nutnosti investice do rozšíření přípojky včetně dalšího transformátoru, se investice do akumulačního systému více než vrátí. Proto se dá takovéto řešení doporučit pro projektování dobíjecích stanic. S rozvojem elektromobility lze očekávat nutnost budování takovýchto zařízení ve větší míře.

## Seznam symbolů a zkratek

AC	Střídavý proud (Alternating Current)
BESS	Bateriový systém akumulace energie (Battery Energy Storage System)
BEV	Elektromobil (Battery Electric Vehicle)
CCS	Kombinovaný systém dobíjení (Combined Charging System)
ČEZ	ČEZ, a. s.
ČR	Česká republika
DC	Stejnoseměrný proud (Direct Current)
DoD	Hloubka vybití akumulátoru (Depth of Discharge)
DPH	Daň z přidané hodnoty
DS	Distribuční soustava
E.ON	E.ON Česká republika, s. r. o.
EAFO	European Alternative Fuels Observatory
EoL	Konec životnosti (End of Life)
ESVO	Evropské sdružení volného obchodu
EU	Evropská unie
EV	Elektrické vozidlo (Electric Vehicle)
FVE	Fotovoltaická výrobní elektrárny
HDO	Hromadné dálkové ovládání
CHAdemo	Nabít pro pohyb (CHARGE de MOVe)
IBM	Mezinárodní technologická společnost (International Business Machines)
LDS	Lokální distribuční soustava
LUV	Lehká užitková vozidla (kategorie N1)
MIT	Massachusettský technologický institut (Massachusetts Institute of Technology)
MOL	MOL Česká republika, s.r.o.
MPO	Ministerstvo průmyslu a obchodu ČR
NEDC	New European Driving Cycle (metodika měření spotřeby, od r. 1980)
NN	Nízké napětí
NOCT	Nominální provozní teplota článku (Nominal Operating Cell Temperature)
NPV	Čistá současná hodnota (Net Present Value)
OA	Osobní automobily (kategorie M1)
PDS	Provozovatel distribuční soustavy

PHEV	Plug-in hybrid (Plug-in Hybrid Electric Vehicle)
PLC	Programovatelný logický automat (Programmable Logic Controller)
PRE	Pražská energetika, a.s.
RTU	Vzdálená terminálová jednotka (Remote Terminal Unit)
SDA	Svaz dovozců automobilů
SoC	Stav nabití akumulátoru (State of Charge)
STC	Standardní testovací podmínky (Standard Test Conditions)
UK	Spojené království Velké Británie a Severního Irska
UPS	Zdroj nepřerušovaného napájení (Uninterruptible Power Supply/Source)
UTC	Koordinovaný světový čas (Coordinated Universal Time)
VN	Vysoké napětí
WLTP	Worldwide Harmonised Light Vehicle Test Procedure (metodika měření spotřeby, od r. 2017)

## Seznam použité literatury

- [1] PRE. Unikátní řešení městské nabíjecí infrastruktury v Pražských Holešovicích. In: *PRE* [online]. Praha, 2018 [cit. 2019-10-14]. Dostupné z: <https://www.pre.cz/cs/profil-spolecnosti/media/tiskove-zpravy/unikatni-reseni-mestske-nabijeci-infrastruktury-v-prazskych-holesovicich/>
- [2] KUBÁTOVÁ, Věra. Smart grid v praxi: Nabíječka elektromobilů díky FVE a baterii pomáhá stabilizovat síť. In: *TZB-info* [online]. Topinfo, 2018 [cit. 2019-10-15]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektriny/17921-smart-grid-v-praxi-nabijacka-elektromobilu-diky-fve-a-baterii-pomaha-stabilizovat-sit>
- [3] PYLONTECH. Lithium-Ion Phosphate Battery PowerCube-M1 Product Manual. In: *Solid Power Distribution* [online]. Shanghai, China, 2019 [cit. 2019-10-16]. Dostupné z: <https://www.solidpower.cz/media/3279/pylontech-manual-powercube-m1-en.pdf?&key=ZGpmIyQwNUZfMzI3OQ==>
- [4] PYLONTECH. High Voltage Energy Storage System. In: *Solid Power Distribution* [online]. Shanghai, China, 2019 [cit. 2019-10-16]. Dostupné z: <https://www.solidpower.cz/media/3281/pylontech-datasheet-powercube-en.pdf?&key=ZGpmIyQwNUZfMzI4MQ==>
- [5] ČERMÁK, Michal. *ENERGON. Technická zpráva: Rychlodobíjecí stanice pro elektromobily, Dokumentace skutečného provedení*. Brno, 2017.
- [6] ALPITRONIC. Product brief: Hypercharger 225 and hypercharger 300. In: *Hypercharger* [online]. Bolzano, Italy, 2018 [cit. 2019-12-21]. Dostupné z: [https://www.hypercharger.it/wp-content/uploads/2018/06/HYC\\_225\\_300\\_produktribrief\\_v20180513.pdf](https://www.hypercharger.it/wp-content/uploads/2018/06/HYC_225_300_produktribrief_v20180513.pdf)
- [7] ENSTO. Chago Pro. In: *Ensto* [online]. Porvoo, Finland, 2016 [cit. 2019-12-21]. Dostupné z: [http://products.ensto.com/documents/datasheet/Solutions/EVF\\_RAK108\\_14032016.pdf](http://products.ensto.com/documents/datasheet/Solutions/EVF_RAK108_14032016.pdf)
- [8] *BATTEX: Slovníček a pojmy*. [online]. BATTEX, 2019 [cit. 2019-11-01]. Dostupné z: <http://www.battex.info/slovnicek-a-pojmy>
- [9] REDDY, Thomas B. *Linden's Handbook of Batteries*. 4th ed. New York, USA: The McGraw-Hill Companies, 2011. ISBN 978-0-07-162421-3.
- [10] *Battery University: Learn About Batteries*. [online]. Cadex Electronics, 2019 [cit. 2019-11-02]. Dostupné z: <https://batteryuniversity.com/learn/>
- [11] CETL, Tomáš. *Aplikace elektrochemických zdrojů*. Praha: ČVUT, 2004. ISBN 80-01-02859-3.
- [12] ČEČÁK, Adam, manažer elektromobility ve společnosti PRE. Rozhovor. Praha, 15.11.2019.
- [13] AMIRYAR, Mustafa & Keith PULLEN. A Review of Flywheel Energy Storage System Technologies and Their Applications. In: *ResearchGate* [online]. London, UK, 2017 [cit. 2019-12-28]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/315325166\\_A\\_Review\\_of\\_Flywheel\\_Energy\\_Storage\\_System\\_Technologies\\_and\\_Their\\_Applications](https://www.researchgate.net/publication/315325166_A_Review_of_Flywheel_Energy_Storage_System_Technologies_and_Their_Applications)
- [14] HOLLA, Rashmi. Energy Storage Methods - Superconducting Magnetic Energy Storage - A Review. In: *The Journal of Undergraduate Research at the University of Illinois at Chicago* [online]. University of Illinois at Chicago, 2015 [cit. 2019-12-29]. Dostupné z: <https://journals.uic.edu/ojs/index.php/JUR/article/view/7540>
- [15] *Svaz dovozců automobilů* [online]. Svaz dovozců automobilů - SDA, 2020 [cit. 2020-03-08]. Dostupné z: <http://portal.sda-cia.cz/>
- [16] *European Alternative Fuels Observatory: Vehicles and fleet* [online]. European Commission, 2019 [cit. 2020-03-09]. Dostupné z: <https://www.eafo.eu/>
- [17] *PlugShare* [online]. Recargo, 2020 [cit. 2020-04-11]. Dostupné z: <https://www.plugshare.com/>
- [18] Ministerstvo průmyslu a obchodu, Ministerstvo životního prostředí, Ministerstvo dopravy. *Aktualizace Národního akčního plánu čisté mobility (NAP CM) 2019*. Praha, 2019. Dostupné také z: <https://www.komora.cz/legislation/171-19-aktualizace-narodniho-akcniho-planu-ciste-mobility-t-27-12-2019/>
- [19] EUROENERGY. *Dílčí studie pro pracovní tým A25 - Predikce vývoje elektromobility v ČR* [online]. Praha, 2018 [cit. 2020-03-14]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/cz/energetika/konference-seminare/elektromobilita--240934/>
- [20] *Electric car database - EVDB.io* [online]. 2020 [cit. 2020-03-14]. Dostupné z: <https://evdb.io/>
- [21] *Electric Vehicle Database* [online]. 2020 [cit. 2020-03-14]. Dostupné z: <https://ev-database.org/>
- [22] *FASTNED: Vehicles & charging tips* [online]. 2020 [cit. 2020-04-01]. Dostupné z: <https://support.fastned.nl/hc/en-gb/sections/115000180588-Cars-charging-tips>
- [23] *Celostátní sčítání dopravy 2016* [online]. Ředitelství silnic a dálnic ČR, 2017 [cit. 2020-04-06]. Dostupné z: <http://scitani2016.rsd.cz/pages/map/default.aspx>
- [24] BARTOŠ, Luděk a Aleš RICHTR. Aktualizace prognózy vývoje automobilové dopravy v ČR metodou jednotného součinitele růstu - 1. část. *Silniční obzor*. Česká silniční společnost, 2013, 74(1), 19-23.
- [25] BloombergNEF. *Electric Transport Revolution Set To Spread Rapidly Into Light and Medium Commercial Vehicle Market. BNEF's Electric Vehicle Outlook 2019* [online]. BloombergNEF, 2019 [cit. 2020-04-06].

- Dostupné z: <https://about.bnef.com/blog/electric-transport-revolution-set-spread-rapidly-light-medium-commercial-vehicle-market/>
- [26] ABB. *High Power Charging*. [online]. ABB, 2020 [cit. 2020-04-07]. Dostupné z: <https://new.abb.com/ev-charging/products/car-charging/high-power-charging>
- [27] ENERGI-SERVIS. *Elektromobilita* [online]. Brno, 2015 [cit. 2020-04-09]. Dostupné z: <http://www.energyservis.cz/elektromobilita.html>
- [28] IfTECH: *Solární panely, konstrukce pro solární elektrárny, solární měniče, bateriové systémy*. [online]. ifTECH, 2015 [cit. 2020-04-10]. Dostupné z: <https://shop.iftech.cz/>
- [29] KREL CENTRAL: *Fotovoltaické panely, měniče napětí, solární akumulátory, konstrukce pro FVE*. [online]. KREL CENTRAL, 2020 [cit. 2020-04-10]. Dostupné z: <https://www.elektrocentrally.cz/>
- [30] MASTNÝ, Petr. *Obnovitelné zdroje elektrické energie*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN ISBN978-80-01-04937-2.
- [31] *Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS)* [online]. European Commission, 2019 [cit. 2020-04-11]. Dostupné z: <https://re.jrc.ec.europa.eu>
- [32] SUNTECH POWER. HyPro Mono Half Cell Solar Module - Datasheet. In: *IfTECH* [online]. Suntech Power, 2018 [cit. 2020-04-11]. Dostupné z: <https://shop.iftech.cz/solarni-panely/1495-solarni-panel-suntech-370wp-mono-stribrny-ram.html>
- [33] TESVOLT. *Energy Storage Systems For Renewable Energies*. [online]. TESVOLT, 2020 [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: <https://www.tesvolt.com>
- [34] SMA Solar Technology AG: *Inverter & Photovoltaics solutions* [online]. SMA Solar Technology, 2020 [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: <https://www.sma.de>
- [35] ČSN EN 50160: *Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejných distribučních sítí*. Ed. 3. Praha: ÚNMZ, 2011.
- [36] PROVOZOVATELÉ DISTRIBUČNÍCH SOUSTAV. *Pravidla provozování distribučních soustav, Příloha 4: Pravidla pro paralelní provoz výroben a akumulčních zařízení se sítí provozovatele distribuční soustavy*. 2018.
- [37] PROVOZOVATELÉ DISTRIBUČNÍCH SOUSTAV. *Pravidla provozování distribučních soustav, Příloha 6: Standardy připojení zařízení k distribuční soustavě*. 2020.
- [38] ČEZ DISTRIBUCE. *Připojovací podmínky pro umístění měřících zařízení v odběrných a předacích místech napojených ze sítí VN, VVN*. 2009. Dostupné také z: <https://www.cezdistribuce.cz/edee/content/file-other/distribuce/technicke-informace/kpp-ab-2009.pdf>
- [39] ČEZ DISTRIBUCE. *Připojovací podmínky pro výrobní elektrárny: pro připojení na síť ČEZ Distribuce, a. s.* 2012. Dostupné také z: [https://www.cezdistribuce.cz/edee/content/file-other/distribuce/technicke-informace/cezdistribuce\\_pripojovacipodminkyve\\_201206\\_preview7.pdf](https://www.cezdistribuce.cz/edee/content/file-other/distribuce/technicke-informace/cezdistribuce_pripojovacipodminkyve_201206_preview7.pdf)
- [40] Vyhláška č. 16/2016 Sb., o podmínkách připojení k elektrizační soustavě. In: *Sbírka zákonů*. 2016, částka 7.
- [41] Příloha č. 7 k vyhlášce č. 408/2015 Sb., o Pravidlech trhu s elektřinou. In: *Sbírka zákonů*. 2015, částka 169.
- [42] Vyhláška č. 82/2011 Sb., o měření elektřiny a o způsobu stanovení náhrady škody při neoprávněném odběru, neoprávněné dodávce, neoprávněném přenosu nebo neoprávněné distribuci elektřiny. In: *Sbírka zákonů*. 2011, částka 31.
- [43] Cenové rozhodnutí Energetického regulačního úřadu č. 5/2019 ze dne 26. listopadu 2019, kterým se stanovují ceny za související službu v elektroenergetice a ostatní regulované ceny. In: *Energetický regulační VĚSTNÍK*. Jihlava: Energetický regulační úřad, 2019, ročník 19, částka 8/2019.
- [44] MAJDA, František. *Čtvrt hodinové maximum*. ELEKTRO. Praha: FCC PUBLIC, 2008(12), 26-28.
- [45] PRACOVNÍ SKUPINA NAP SG P10, EGÚ BRNO., EGC ENERGOCONSULT ČB. *Management Q: Executive Summary*. 2019. Dostupné také z: [https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/strategicke-a-koncepcni-dokumenty/narodni-akcni-plan-pro-chytre-site/2019/10/Management\\_Q\\_Executive\\_Summary\\_1.pdf](https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/strategicke-a-koncepcni-dokumenty/narodni-akcni-plan-pro-chytre-site/2019/10/Management_Q_Executive_Summary_1.pdf)
- [46] MINISTERSTVO PRO MÍSTNÍ ROZVOJ ČR. *Průměrné ceny dopravní a technické infrastruktury obcí: Kapitola 4 – Zásobování elektrickou energií*. 2019. Dostupné také z: <http://www.uur.cz/default.asp?ID=899>
- [47] Inflace - 2020, míra inflace a její vývoj v ČR. In: *Kurzy.cz* [online]. 2020 [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: <https://www.kurzy.cz/makroekonomika/inflace/>
- [48] Commercial energy storage for 10 Cent/kWh. In: *pv Europe* [online]. 2017 [cit. 2020-04-16]. Dostupné z: <https://www.pveurope.eu/News/Energy-Storage/Commercial-energy-storage-for-10-Cent-kWh>
- [49] SCHMIDT et al. Projecting the Future Levelized Cost of Electricity Storage Technologies. *Joule*. Cell Press, 2019, (3), 81-100. Dostupné také z: [https://www.cell.com/joule/pdfExtended/S2542-4351\(18\)30583-X](https://www.cell.com/joule/pdfExtended/S2542-4351(18)30583-X)

## Seznam obrázků

Obr. 1-1 Konstrukce jednočlánekového válcového akumulátoru [8].....	21
Obr. 1-2 Pohyb iontů v Li-ion akumulátoru [10] (upraveno).....	24
Obr. 1-3 Typické měrné energie jednotlivých typů akumulátorů [10].....	27
Obr. 1-4 Konstrukce NaS článku [10] (upraveno).....	28
Obr. 1-5 Uspořádání průtokového akumulátoru [10] (upraveno) .....	32
Obr. 1-6 Princip palivového článku [10] (upraveno).....	36
Obr. 1-7 Struktura a komponenty setrvačnicku [13] (upraveno) .....	41
Obr. 1-8 Pohled do kontejneru se setrvačníky (zdroj: Škoda Auto DigiLab).....	43
Obr. 2-1 Registrace nových elektromobilů a plug-in hybridů v letech 2010-2019 v ČR (kategorie M1 a N1), dle [16].....	45
Obr. 2-2 Registrace nových elektromobilů a plug-in hybridů v letech 2010-2019 v Evropě (EU+UK+ESVO+Turecko, kategorie M1 a N1), dle [16].....	46
Obr. 2-3 Projekce počtu elektrovozidel v letech 2018-2040 v jednotlivých scénářích ve všech kategoriích (osobní, lehké užitkové a nákladní automobily, autobusy (MHD)), dle [19] .....	50
Obr. 2-4 Vývoj počtu elektromobilů s výhledem k roku 2030, dle [18] .....	52
Obr. 2-5 Vývoj počtu dobíjecích bodů v letech 2010-2019 v ČR, dle [16] .....	53
Obr. 2-6 Mapa rozložení veřejných dobíjecích lokalit v rámci ČR, zelená – běžné, oranžová – vysoce výkonné, hnědá – omezený přístup, (duben 2020) [17].....	54
Obr. 2-7 Veřejně přístupná infrastruktura pro 220 000 vozidel [18].....	56
Obr. 2-8 Veřejně přístupná infrastruktura pro 500 000 vozidel [18].....	56
Obr. 2-9 Rozdělení časů zahájení dobíjení veřejného rychlého dobíjení [19].....	57
Obr. 2-10 Dobíjecí křivky vybraných elektromobilů, dle [22] .....	58
Obr. 2-11 Poměrná střední dobíjecí křivka.....	59
Obr. 2-12 Požadavky na dodávku nebo odběr jalového výkonu při $U_n$ [36].....	61
Obr. 2-13 Frekvenční odezva činného výkonu na podfrekvenci u akumulárního zařízení [36].....	62
Obr. 3-1 Nabíjecí stanice společnosti PRE v pražských Holešovicích (zdroj: fotoarchiv autora).....	67
Obr. 3-2 Schéma nabíjecí stanice [2].....	69
Obr. 3-3 Akumulátorový systém PowerCube-M1 [3].....	70
Obr. 3-4 Nabíjecí stanice Chago Pro EVF 200 [7] .....	72
Obr. 3-5 Změřený průběh výkonů a napětí z 3. 3. 2019, zdroj PRE .....	73
Obr. 3-6 Průběh výkonů na DC dobíjecím stojanu 19. 03. 2020, zdroj PRE .....	74
Obr. 4-1 Navrhované uspořádání dobíjecí stanice .....	76
Obr. 4-2 Uvažované umístění dobíjecí stanice (podklad mapy.cz).....	77
Obr. 4-3 Dobíjecí stanice ABB Terra HP [26] .....	79
Obr. 4-4 Dobíjecí stanice Hypercharger 300 [6].....	81



Obr. 4-5 Akumulátorový systém TESVOLT TS HV 70 [33] .....	83
Obr. 4-6 Konfigurace systému - dostupný výkon v závislosti na energii a počtu měničů SMA STPS 60 [33].....	84
Obr. 4-7 Řídicí jednotka Inverter Manager a měnič SMA Sunny Tripower Storage 60 [34].....	85
Obr. 4-8 Fotovoltaický modul Suntech Power HyPro STP370S - 24/Vfh [32] .....	87
Obr. 4-9 Návrh rozestupů mezi jednotlivými řadami modulů (rozměry v mm).....	89
Obr. 4-10 Produkce elektrické energie FVE, dle [31] .....	91
Obr. 4-11 Intenzita dopadajícího slunečního záření, dle [31] .....	91
Obr. 4-12 Propojení fotovoltaických modulů (vytvořeno v programu PV*SOL) .....	93
Obr. 4-13 Základní blokové uspořádání dobíjecí stanice (Matlab Simulink).....	94
Obr. 4-14 Průběhy veličin na vývodu k dobíjecím stojanům – 2020.....	102
Obr. 4-15 Průběhy veličin na AC straně měniče akumulčního systému – 2020.....	103
Obr. 4-16 Průběhy veličin v místě připojení k DS – 2020.....	104
Obr. 4-17 Průběhy veličin na AC straně střídače FVE .....	105
Obr. 4-18 Průběhy veličin na vývodu k dobíjecím stojanům – 2025.....	106
Obr. 4-19 Průběhy veličin v místě připojení k DS – 2025.....	107
Obr. 4-20 Průběhy veličin na AC straně měniče akumulčního systému – 2025.....	108
Obr. 4-21 Průběhy veličin na vývodu k dobíjecím stojanům – 2030.....	109
Obr. 4-22 Průběhy veličin v místě připojení k DS – 2030.....	110
Obr. 4-23 Průběhy veličin na AC straně měniče akumulčního systému – 2030.....	111
Obr. 4-24 Časové rozložení dobíjení na jednotlivých dobíjecích stojanech (dobíjecí bod „a“) – 2030 .....	112
Obr. 4-25 Průběhy veličin na vývodu k dobíjecím stojanům – 2035.....	113
Obr. 4-26 Průběhy veličin v místě připojení k DS – 2035.....	114
Obr. 4-27 Průběhy veličin na AC straně měniče akumulčního systému – 2035.....	115
Obr. 4-28 Průběhy veličin na vývodu k dobíjecím stojanům – 2040.....	116
Obr. 4-29 Časové rozložení současně dobíjených EV a jejich kumulativní počet v rámci dne – 2040 .....	117
Obr. 4-30 Průběhy veličin v místě připojení k DS – 2040.....	118
Obr. 4-31 Průběhy veličin na AC straně měniče akumulčního systému – 2040.....	119
Obr. 4-32 Průběhy veličin u dobíjecího stojanu č. 3 – 2040.....	120

## Seznam tabulek

Tab. 1-1 Výhody a nevýhody olovených akumulátorů [8], [10], [11] .....	19
Tab. 1-2, Výhody a nevýhody NiCd akumulátorů [8], [10].....	21
Tab. 1-3 Výhody a nevýhody NiFe akumulátorů [8], [10], [11].....	22
Tab. 1-4 Výhody a nevýhody NiMH akumulátorů [8], [10].....	22
Tab. 1-5 Výhody a nevýhody NiZn akumulátorů [10] .....	23
Tab. 1-6 Výhody a nevýhody NiH akumulátorů [10].....	23
Tab. 1-7 Výhody a nevýhody Li-ion akumulátorů [8], [10] .....	25
Tab. 1-8 Shrnutí nejběžnějších Li-ion akumulátorů (článků) [10].....	26
Tab. 1-9 Charakteristika běžně používaných akumulátorů (článků) [10] .....	27
Tab. 1-10 Výhody a nevýhody NaS a ZEBRA akumulátorů [10], [11].....	29
Tab. 1-11 Výhody a nevýhody zinek-vzduch akumulátoru [10].....	30
Tab. 1-12 Výhody a nevýhody AgZn akumulátoru [10].....	30
Tab. 1-13 Shrnutí nejběžnějších alternativních akumulátorů a ekvivalentů [10].....	31
Tab. 1-14 Výhody a nevýhody průtokového akumulátoru [10].....	32
Tab. 1-15 Shrnutí nadějných budoucích akumulátorů [10].....	35
Tab. 1-16 Výhody a nevýhody palivových článků [10].....	37
Tab. 1-17 Porovnání superkapacitoru s Li-ion akumulátorem [10] .....	38
Tab. 1-18 Výhody a nevýhody superkapacitoru [10].....	38
Tab. 1-19 Shrnutí akumulačních systémů odlišných od elektrochemického konceptu [10].....	39
Tab. 1-20 Výhody a nevýhody supravodivého magnetického systému akumulace [14].....	40
Tab. 1-21 Výhody a nevýhody setrvačnickového systému akumulace [12], [13].....	42
Tab. 2-1 Nejvíce zastoupené elektromobily v kategorii OA ve vozovém parku ČR (2019), dle [16], [15], [20], [21] .....	47
Tab. 2-2 Vybrané elektromobily, které se nově začaly vyrábět nebo jsou ve fázi konceptu a jejich produkce by měla začít do 3 let, dle [20], [21] .....	48
Tab. 2-3 Nejvíce zastoupené elektromobily v kategorii LUV ve vozovém parku ČR (2019), dle [16], [15], [20], [21].....	48
Tab. 2-4 Nejvíce zastoupené plug-in hybridy v kategorii OA ve vozovém parku ČR (2019), dle [16], [15], [20], [21].....	49
Tab. 2-5 Očekávaný počet osobních automobilů a lehkých užitkových vozů typu BEV, dle [19] .....	50
Tab. 2-6 Očekávaný počet osobních automobilů typu BEV a PHEV [18] .....	51
Tab. 2-7 Projekce počtu vozidel v r. 2030 – nízký scénář [18].....	51
Tab. 2-8 Projekce počtu vozidel v r. 2030 – střední scénář [18].....	51
Tab. 2-9 Projekce počtu vozidel v r. 2030 – vysoký scénář [18] .....	51
Tab. 2-10 Lokality pro dobíjecí stanice [18] .....	55

Tab. 2-11 Ochrany rozpadového místa výroben s moduly (VM (A2), B1, B2, C) [36].....	60
Tab. 3-1 Parametry akumulátorového systému [4].....	70
Tab. 4-1 Denní vytíženost dobíjecí stanice, určeno pomocí [19], [23], [24], [25].....	78
Tab. 4-2 Parametry nabíjecí stanice ABB Terra HP [26].....	80
Tab. 4-3 Parametry dobíjecí stanice Alpitronic Hypercharger 300 [6].....	82
Tab. 4-4 Parametry akumulátorového systému TESVOLT TS HV 70 [33].....	83
Tab. 4-5 Parametry měniče SMA Sunny Tripower Storage 60 [34].....	85
Tab. 4-6 Parametry SMA Inverter Manager [34].....	86
Tab. 4-7 Výběr fotovoltaických modulů, na základě [28], [29].....	87
Tab. 4-8 Parametry fotovoltaického modulu Suntech Power HyPro STP370S - 24/Vfh [32].....	88
Tab. 4-9 Návrh sklonu modulů, s využitím dat z PVGIS [31].....	89
Tab. 4-10 Produkce elektrické energie FVE, dle [31].....	90
Tab. 4-11 Parametry střídače SMA Sunny Tripower 15000TL-30 [34].....	92
Tab. 4-12 Ekonomické porovnání variant s doporučeným časovým rozložením úpravy systému.....	101

## Seznam příloh

Tabulka 1 Vstupní parametry elektromobilů 2020-2040.....	132
Tabulka 2 Vygenerované parametry dobíjení – 2020.....	133
Tabulka 3 Vygenerované parametry dobíjení – 2025.....	133
Tabulka 4 Vygenerované parametry dobíjení – 2030.....	134
Tabulka 5 Vygenerované parametry dobíjení – 2035.....	135
Tabulka 6 Vygenerované parametry dobíjení – 2040.....	136

# Přílohy

Tabulka 1 Vstupní parametry elektromobilů 2020-2040

Kód vozidla	Model vozidla	2020			2025			2030			2035			2040		
		Počet [ks]	Kapacita akumulátoru [kWh]	Max. výkon [kW]	Počet [ks]	Kapacita akumulátoru [kWh]	Max. výkon [kW]	Počet [ks]	Kapacita akumulátoru [kWh]	Max. výkon [kW]	Počet [ks]	Kapacita akumulátoru [kWh]	Max. výkon [kW]	Počet [ks]	Kapacita akumulátoru [kWh]	Max. výkon [kW]
1	BMW i3	463	27,2	50	463	27,3	50	463	38,0	50	463	38,0	50	463	47,0	50
2	Volkswagen e-Golf	457	32,0	40	457	32,0	40	457	32,0	40	457	47,0	100	457	58,0	100
3	Nissan Leaf	446	38,0	50	446	38,0	50	446	60,0	100	446	60,0	100	446	60,0	100
4	Volkswagen e-Up!	291	32,3	40	291	32,3	40	291	32,3	40	291	32,3	40	291	38,0	40
5	Tesla Model S	269	80,8	150	269	80,8	150	269	80,8	150	269	94,0	150	269	94,0	200
6	Hyundai Ioniq Electric	143	28,0	70	143	38,3	70	143	38,3	70	143	60,0	70	143	60,0	70
7	Tesla Model X	113	87,0	150	113	87,0	150	113	87,0	200	113	95,0	200	113	95,0	200
8	Peugeot iOn	93	14,5	40	93	14,5	40	93	32,3	40	93	32,3	40	93	58,0	80
9	Nissan e-NV200 (Evia)	143	38,0	50	143	38,0	50	143	38,0	50	143	47,0	80	143	47,0	80
10	Tesla Model 3	73	74,0	200	100	74,0	250	100	74,0	250	100	74,0	250	100	95,0	250
11	Jaguar i-Pace	60	84,7	100	60	84,7	100	60	84,7	100	60	84,7	100	60	84,7	100
12	Hyundai Kona Electric	51	64,0	80	51	64,0	80	51	64,0	80	51	64,0	80	51	64,0	80
13	Audi e-Tron	47	83,6	150	47	83,6	150	47	83,6	150	47	83,6	150	47	83,6	150
14	Citroen C-Zero	45	14,5	40	45	14,5	40	45	14,5	40	45	32,3	40	45	58,0	80
15	Kia Soul EV (e-Soul)	33	64,0	80	33	64,0	80	33	64,0	100	33	64,0	100	33	64,0	100
16	Škoda CITIGOe IV	28	32,3	40	28	32,3	40	28	32,3	40	28	32,3	40	28	32,3	40
17	Renault Zoe	16	37,0	50	16	47,0	50	16	47,0	50	16	47,0	50	16	58,0	50
18	Peugeot Partner Electric	23	20,5	40	23	20,5	40	23	20,5	40	23	20,5	40	23	38,0	40
19	Citroen Berlingo Electric	5	20,5	40	5	20,5	40	5	20,5	40	5	20,5	40	5	20,5	40
20	Volkswagen e-Crafter	2	32,3	40	2	32,3	40	2	32,3	40	2	32,3	40	2	60,0	100
21	SAIC Maxus EV80	2	53,0	60	2	53,0	60	2	53,0	60	2	53,0	60	2	53,0	60
22	Průměrný model I	100	46,0	80	100	48,0	80	200	48,0	100	200	64,0	150	200	83,7	150
23	Kia e-Niro	0	38,0	60	0	64,0	80	10	64,0	80	10	64,0	80	30	64,0	80
24	Mercedes-Benz EQC	0	78,0	110	0	78,0	110	20	78,0	110	20	78,0	110	80	78,0	110
25	Peugeot e-208	0	47,5	100	30	47,5	100	30	47,5	100	210	47,5	100	250	64,0	100
26	Porsche Taycan	0	83,7	270	5	83,7	270	15	83,7	270	15	83,7	270	80	83,7	270
27	Volkswagen ID.3	0	58,0	100	30	58,0	100	30	58,0	100	80	58,0	100	220	58,0	100
28	Tesla Model Y	0	74,0	250	15	74,0	250	30	74,0	250	30	74,0	250	90	74,0	250
29	BMW iX3	0	74,0	150	0	74,0	150	40	74,0	150	40	74,0	150	150	74,0	150
30	Volvo XC40 Recharge	0	75,0	150	0	75,0	150	20	75,0	150	20	75,0	150	50	75,0	150
31	Volkswagen ID.4	0	77,0	125	0	77,0	125	0	77,0	125	20	77,0	125	150	77,0	125
32	Ford Mustang Mach-E	0	90,0	150	0	90,0	150	0	90,0	150	15	90,0	150	15	90,0	150
33	Škoda ENYAQ	0	77,0	125	20	77,0	125	20	77,0	125	120	77,0	125	170	77,0	125
34	Audi e-Tron GT	0	85,0	350	0	85,0	350	10	85,0	350	25	85,0	350	50	85,0	350
35	Průměrný model II	0	83,7	150	0	83,7	150	0	83,7	150	200	83,7	100	250	83,7	100

Tabulka 2 Vygenerované parametry dobíjení – 2020

Čas	Kód vozidla	Počáteční SoC [%]	Konečný SoC [%]
6:56:16	5	29	55
7:35:50	1	21	71
8:00:50	3	16	77
8:21:44	2	43	80
11:24:43	18	30	75
14:23:00	9	27	76
15:14:39	7	23	79
15:19:40	6	15	65
15:23:45	5	12	62
16:38:48	2	19	63
17:58:53	6	29	68

Tabulka 3 Vygenerované parametry dobíjení – 2025

Čas	Kód vozidla	Počáteční SoC [%]	Konečný SoC [%]
1:25:49	9	33	73
4:49:14	2	46	74
7:00:30	3	7	67
7:03:37	10	51	80
7:06:17	22	29	76
7:06:59	2	27	74
7:07:02	13	15	64
7:09:16	6	22	63
7:28:51	10	17	69
7:35:30	4	21	63
7:54:28	5	45	56
10:48:41	4	40	68
11:43:11	9	43	69
12:54:00	2	51	72
14:02:22	4	30	80
14:16:47	5	42	69
15:07:52	4	26	60
15:11:47	10	12	67
15:15:58	3	53	80
16:24:38	4	22	76
16:38:48	19	31	79
17:06:13	7	49	75
17:10:47	3	48	77
17:25:39	14	52	80
17:45:27	2	16	61
18:18:35	10	57	78
20:23:25	3	53	80
20:32:33	7	10	60
22:26:26	3	35	65

Tabulka 4 Vygenerované parametry dobíjení – 2030

Čas	Kód vozidla	Počáteční SoC [%]	Konečný SoC [%]	Čas	Kód vozidla	Počáteční SoC [%]	Konečný SoC [%]
0:09:00	1	19	75	13:25:28	30	45	67
3:50:13	3	10	63	13:25:41	2	32	74
4:01:14	7	47	59	13:46:11	1	58	80
4:57:23	3	48	63	14:11:20	4	11	80
5:18:37	3	36	55	14:13:28	10	20	72
5:31:47	3	58	71	14:13:34	2	21	66
5:58:37	2	23	74	14:32:11	1	34	76
6:11:54	2	54	74	14:33:46	1	34	80
6:21:00	7	5	54	14:35:05	10	34	78
6:21:07	24	17	65	14:39:10	12	14	68
6:24:31	13	52	64	14:42:17	5	48	78
6:46:30	1	37	65	14:42:49	4	30	62
6:48:26	21	42	61	14:43:35	5	8	61
6:49:36	5	6	60	14:48:43	13	25	55
7:10:35	4	19	80	14:51:44	3	54	71
7:14:57	4	28	79	15:02:48	3	30	80
7:31:50	3	16	51	15:31:39	6	31	60
7:36:37	1	43	68	15:34:48	18	33	79
7:48:59	2	45	80	15:35:25	5	8	61
8:04:15	13	53	69	15:37:28	22	9	74
8:07:39	14	52	80	15:38:38	3	15	77
8:12:16	3	39	58	16:07:47	3	47	73
8:39:32	16	55	77	16:10:58	10	34	50
9:41:31	5	43	53	16:11:14	2	33	72
9:43:35	29	15	61	16:15:31	5	54	68
10:01:10	20	17	69	16:28:50	6	24	72
10:12:46	14	48	72	16:37:59	1	33	63
10:14:08	2	25	80	16:47:51	2	50	76
10:14:27	27	22	74	16:53:53	1	53	78
10:19:18	5	47	57	17:54:57	6	27	79
10:19:42	33	29	59	18:48:50	7	6	64
10:52:43	22	24	65	19:17:42	3	44	68
11:06:17	3	25	64	19:24:50	3	11	59
11:23:25	22	55	66	19:37:48	6	11	70
11:50:23	5	29	75	19:58:43	25	9	80
12:13:25	12	8	61	20:07:51	8	42	73
12:33:22	22	45	75	20:16:22	3	52	75
12:43:42	9	8	74	20:24:02	8	25	61
12:44:25	2	31	67	20:54:24	4	42	62
12:56:26	5	54	75	21:54:16	2	14	67
13:08:16	9	48	76	22:53:21	3	32	76
13:08:28	22	53	64	23:14:21	2	39	80
13:12:10	22	8	63	23:17:44	1	57	79
13:14:08	9	22	75				

Tabulka 5 Vygenerované parametry dobíjení – 2035

Čas	Kód vozidla	Počáteční SoC [%]	Konečný SoC [%]	Čas	Kód vozidla	Počáteční SoC [%]	Konečný SoC [%]	Čas	Kód vozidla	Počáteční SoC [%]	Konečný SoC [%]	Čas	Kód vozidla	Počáteční SoC [%]	Konečný SoC [%]
0:02:49	3	13	60	8:17:12	10	58	73	13:51:34	1	59	79	16:29:05	28	24	58
0:16:55	5	53	67	8:18:15	3	50	72	13:54:57	27	46	69	16:29:54	1	12	71
0:25:24	23	26	79	8:24:02	33	38	56	13:58:13	1	29	73	16:34:38	22	12	56
1:05:50	2	41	78	8:30:26	9	11	59	14:00:08	22	53	77	16:38:00	2	59	73
1:24:13	5	46	72	8:31:52	5	53	79	14:01:24	9	59	74	16:38:20	13	59	74
1:26:07	35	26	51	8:47:45	9	34	55	14:16:47	3	55	80	16:41:59	3	28	79
1:26:18	22	43	53	9:03:10	10	32	80	14:20:26	28	47	57	16:43:09	25	31	76
3:14:54	13	32	80	9:10:00	4	15	67	14:21:21	13	17	59	16:52:56	4	5	76
3:21:47	2	57	77	9:11:26	25	32	57	14:24:34	11	17	54	16:55:59	11	41	78
4:12:53	1	18	75	9:20:46	1	16	78	14:25:28	1	59	79	16:59:52	33	21	57
4:36:09	27	15	62	9:43:13	10	5	63	14:34:27	5	20	64	17:00:24	5	26	63
4:49:21	1	33	69	9:48:03	3	41	63	14:37:35	21	39	73	17:05:55	22	29	62
4:49:58	27	33	73	10:06:27	1	34	75	14:48:05	5	28	68	17:08:15	35	28	63
4:54:16	12	39	54	10:15:11	1	53	76	14:49:32	13	47	75	17:09:52	22	22	63
4:57:30	1	57	78	10:43:13	11	28	58	14:53:09	22	47	64	17:19:11	25	8	76
5:04:51	2	30	65	10:44:33	22	57	69	14:53:47	22	31	76	17:26:12	4	14	68
5:07:35	22	40	58	10:45:35	6	41	64	15:11:43	7	22	61	17:31:22	25	53	63
5:19:40	22	23	71	10:45:38	4	28	63	15:16:28	4	17	64	17:32:17	13	10	62
5:21:52	11	27	57	10:51:26	2	6	76	15:17:55	3	33	75	17:37:13	7	47	65
5:22:51	2	52	72	11:00:43	6	49	78	15:18:35	5	7	66	18:03:01	34	30	60
5:31:46	1	31	78	11:28:31	2	59	73	15:18:49	25	15	72	18:08:13	12	55	74
5:36:28	10	21	77	11:53:24	16	30	65	15:22:39	5	17	67	18:20:14	3	49	64
5:41:28	25	57	75	11:56:33	9	46	66	15:23:02	25	22	67	18:20:25	25	41	61
5:43:53	33	52	67	12:01:45	3	15	61	15:29:01	5	60	78	18:24:25	1	42	66
6:00:35	8	41	61	12:05:41	5	48	62	15:29:13	8	59	79	18:28:07	34	8	57
6:05:42	27	6	79	12:12:24	9	19	66	15:30:23	3	13	72	18:28:57	7	60	72
6:13:58	22	25	67	12:18:02	3	30	58	15:32:30	5	45	75	18:47:26	4	49	71
6:24:06	9	18	76	12:22:28	2	27	56	15:33:40	9	25	80	18:51:00	3	47	74
6:26:49	5	25	58	12:28:18	35	8	53	15:34:01	4	53	80	19:08:58	2	7	65
6:34:50	4	24	72	12:29:59	4	47	76	15:35:44	23	52	70	19:11:19	8	37	64
6:49:54	11	60	75	12:32:19	2	15	51	15:40:15	8	57	80	19:17:25	25	54	74
6:59:38	7	30	63	12:46:09	2	28	56	15:42:35	2	36	69	19:20:52	13	13	72
7:01:00	4	13	75	12:50:20	2	56	77	15:43:34	1	51	74	19:24:45	11	34	77
7:08:07	2	35	57	12:51:44	1	11	76	15:46:08	4	54	75	19:44:48	2	5	55
7:21:24	2	41	57	13:00:36	10	32	70	15:52:55	21	22	59	19:52:14	4	7	71
7:22:08	2	6	74	13:05:19	10	38	52	15:53:11	11	8	57	19:56:25	15	16	59
7:25:06	4	6	78	13:12:22	2	19	56	15:54:09	2	6	69	20:14:53	31	26	62
7:31:22	5	33	52	13:20:10	23	49	73	15:56:51	2	50	68	20:16:17	10	58	73
7:43:04	2	48	58	13:25:43	32	36	80	15:59:13	4	27	68	21:08:15	4	45	79
7:46:37	18	50	80	13:32:13	2	21	77	16:01:18	3	58	74	21:28:02	12	35	66
7:53:52	4	8	80	13:32:19	1	57	79	16:03:54	5	12	60	21:55:27	2	10	69
7:58:01	3	13	77	13:41:40	1	42	65	16:17:49	10	32	50	21:58:52	1	19	74
8:01:53	22	22	77	13:43:06	2	20	70	16:21:22	4	47	77	22:13:15	2	20	62
8:02:27	2	17	75	13:43:58	18	7	74	16:22:21	35	44	69	23:31:28	22	25	57
8:02:42	28	46	71	13:45:12	22	5	61	16:22:37	14	21	80	23:55:55	27	50	80
8:09:16	2	17	73	13:48:35	13	9	58	16:26:45	1	6	78	23:57:34	25	34	50

Tabulka 6 Vygenerované parametry dobíjení – 2040

Čas	Kód vozidla	Počáteční SoC [%]	Konečný SoC [%]	Čas	Kód vozidla	Počáteční SoC [%]	Konečný SoC [%]	Čas	Kód vozidla	Počáteční SoC [%]	Konečný SoC [%]	Čas	Kód vozidla	Počáteční SoC [%]	Konečný SoC [%]
0:05:21	14	49	67	7:34:06	27	50	80	12:29:48	31	27	51	16:28:18	3	57	77
0:34:53	4	42	68	7:36:37	5	31	58	12:35:15	28	34	62	16:36:15	6	36	61
1:04:50	27	54	71	7:37:24	6	22	63	12:39:21	24	9	55	16:41:23	10	26	63
1:31:04	33	48	60	7:46:36	34	45	64	12:43:16	4	55	72	16:46:24	9	6	51
2:51:49	5	53	79	7:48:35	8	18	61	12:47:13	25	31	69	16:48:22	10	38	72
2:55:17	3	48	77	7:53:31	1	17	65	12:47:15	3	29	65	16:49:14	4	25	60
3:10:29	3	24	53	7:58:48	3	44	77	12:49:29	24	22	53	16:51:57	33	59	77
3:33:10	33	52	73	8:03:12	6	60	77	12:58:59	24	27	52	16:52:37	5	27	72
3:39:24	1	41	64	8:08:18	1	54	64	12:59:49	25	26	57	17:07:41	29	34	80
3:43:50	24	32	57	8:17:17	29	55	70	13:07:47	1	25	60	17:10:21	28	22	62
3:48:22	1	37	62	8:19:52	4	17	61	13:09:22	2	13	53	17:10:45	12	59	74
3:51:57	24	49	67	8:24:20	2	35	52	13:15:53	27	18	63	17:11:41	31	36	72
4:31:48	27	46	79	8:30:02	30	23	79	13:16:51	28	34	75	17:15:01	27	25	55
4:34:21	12	37	63	8:33:51	4	52	76	13:21:47	28	36	73	17:16:31	4	28	61
4:43:22	4	12	65	8:38:12	18	14	63	13:22:03	24	44	56	17:19:22	27	32	79
4:44:13	9	25	57	9:01:39	1	20	59	13:25:38	29	27	77	17:22:48	2	6	61
4:52:53	8	49	66	9:05:19	27	59	72	13:26:12	27	15	51	17:29:01	29	46	75
5:12:34	10	41	75	9:06:08	18	59	79	13:28:53	25	54	80	17:39:24	9	55	77
5:25:46	3	44	63	9:08:03	4	14	72	13:32:12	25	30	71	17:41:11	32	18	68
5:29:32	3	26	54	9:15:01	2	24	53	13:37:14	2	39	66	17:41:16	27	10	51
5:36:47	3	41	52	9:22:10	1	46	79	13:39:53	2	30	62	17:43:39	10	36	54
5:40:38	27	44	71	9:28:43	29	21	55	13:41:35	34	33	79	17:45:59	30	52	64
5:49:42	25	58	72	9:30:22	22	39	53	13:53:57	3	50	78	17:47:58	9	49	76
5:50:05	2	26	76	9:33:40	3	53	75	14:05:52	2	10	55	17:49:39	12	45	70
5:57:21	4	50	72	9:34:48	6	20	72	14:11:36	4	47	68	17:59:06	15	24	73
5:59:24	3	5	78	9:35:51	14	45	59	14:20:17	33	40	77	17:59:32	4	19	72
6:00:24	33	53	67	9:42:30	2	20	74	14:24:54	1	23	64	18:08:25	18	19	79
6:04:10	14	32	65	9:46:03	29	48	67	14:24:57	11	33	70	18:09:29	33	20	52
6:08:55	2	38	54	9:46:09	9	57	76	14:31:03	28	55	68	18:24:39	5	57	73
6:10:19	6	49	78	9:54:34	3	23	63	14:32:57	11	49	67	18:36:15	6	6	67
6:11:25	28	58	80	9:54:45	31	52	65	14:42:40	6	24	72	18:47:00	1	53	69
6:11:27	2	53	69	9:55:55	2	14	50	14:43:42	27	50	73	18:50:19	27	28	65
6:18:20	4	44	72	9:57:29	32	27	57	14:57:06	25	20	77	18:55:28	6	56	73
6:21:22	12	60	75	10:02:28	3	5	71	15:07:15	2	48	71	18:58:16	24	21	55
6:26:27	2	43	58	10:03:43	31	60	70	15:08:40	34	47	69	19:03:14	22	29	64
6:28:12	4	5	76	10:06:36	12	21	79	15:13:36	2	26	64	19:05:14	25	17	58
6:28:48	3	53	69	10:07:07	5	34	53	15:20:37	26	42	78	19:12:29	5	16	53
6:42:16	13	40	55	10:11:45	4	57	79	15:22:00	2	38	66	19:19:53	17	24	74
6:43:04	31	36	65	10:19:43	4	10	65	15:33:41	33	46	61	19:27:02	22	40	65
6:49:41	27	27	68	10:24:28	31	29	50	15:33:47	5	47	61	19:31:14	4	13	63
6:51:38	33	47	61	10:30:43	25	40	72	15:34:16	29	21	58	19:42:42	35	41	57
6:52:02	25	33	57	10:34:35	1	16	50	15:35:12	3	16	50	19:45:55	13	60	75
6:53:11	10	57	77	10:38:17	28	44	61	15:39:46	3	31	58	19:48:01	25	51	71
6:58:54	3	38	71	10:40:55	33	12	63	15:42:28	34	40	60	19:50:37	1	26	56
6:58:56	22	31	62	10:58:26	4	20	69	15:46:28	4	57	80	20:07:14	3	22	67
6:59:56	35	46	77	11:08:38	6	32	62	15:51:05	24	26	60	20:10:01	27	40	67
7:02:56	2	43	62	11:10:39	33	41	54	16:00:59	5	14	68	20:16:48	2	42	52
7:03:12	27	25	62	11:11:44	3	6	50	16:01:40	3	39	59	20:24:27	5	43	71
7:04:50	11	23	60	11:19:31	5	28	50	16:04:44	13	15	65	20:33:02	4	35	60
7:05:05	8	16	73	11:21:56	4	19	80	16:05:18	26	20	71	20:34:06	1	8	76
7:06:32	22	42	75	11:25:42	35	32	64	16:06:18	5	29	76	20:37:33	4	54	76
7:06:48	10	53	67	11:33:21	6	12	58	16:06:24	11	37	74	20:51:06	34	22	56
7:19:26	33	16	52	11:36:38	2	7	53	16:07:56	24	17	68	20:54:56	2	13	80
7:19:51	30	36	79	11:54:22	1	56	75	16:08:00	25	21	50	21:02:33	9	41	53
7:19:59	13	41	65	11:57:57	30	38	78	16:09:49	4	8	74	21:14:01	22	18	54
7:20:13	9	35	69	12:04:57	24	57	79	16:10:17	8	26	60	21:40:39	12	26	52
7:25:13	3	49	73	12:11:42	25	53	77	16:11:32	32	18	65	21:41:40	7	43	75
7:26:21	4	18	80	12:17:11	8	41	72	16:14:52	3	46	72	22:10:30	6	36	74
7:28:45	7	36	65	12:20:03	28	38	56	16:15:12	4	5	80	22:21:37	2	59	76
7:29:04	3	49	59	12:20:38	2	56	66	16:22:40	5	23	68	22:53:13	12	48	67
7:29:25	9	42	71	12:21:18	3	10	60	16:23:33	3	42	53	23:13:53	5	57	78
7:30:21	1	56	66	12:23:36	2	52	62	16:24:10	8	9	76	23:14:21	11	37	56
7:31:38	31	39	71	12:27:46	4	36	71	16:27:41	13	45	58	23:55:07	1	43	53