

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

System akumulace energie z fotovoltaických panelů

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2017/2018

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jiří MAREŠ**

Osobní číslo: **E16N0125P**

Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**

Studijní obor: **Elektroenergetika**

Název tématu: **Systém akumulace energie z fotovoltaických panelů**

Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Zhodnoňte problematiku akumulace elektrické energie z fotovoltaických panelů.
2. Porovnejte technologii ukládání přebytečné elektrické energie do elektrochemických baterií a vodíku.
3. Zpracujte modelový příklad sítě nn včetně akumulační technologie.
4. Vyhodnoňte použití akumulační technologie v síti nn a nastiňte předpokládaný vývoj energetického trhu ČR v budoucnu.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **40 - 60 stran**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

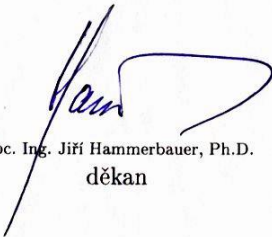
Seznam odborné literatury:

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


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jaroslav Holý**
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: **10. října 2017**

Termín odevzdání diplomové práce: **24. května 2018**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 10. října 2017

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na popis problematiky spojené se začleňováním čím dál tím většího počtu obnovitelných zdrojů energie do české elektrizační soustavy. Jedním z hlavních řešení možnosti integrace většího množství intermitentních zdrojů je využití akumulace energie. Toho si všímá státní program Ministerstva životního prostředí – Nová zelená úsporám, který poskytuje dotace na solární elektrárny na střechy obytných domů v České republice. Dotace poskytuje pouze v případě instalace společně s akumulací energie.

První dvě kapitoly práce obecně popisují technologie dostupné pro akumulaci elektrické energie a jejich možné přínosy.

Praktická část práce je zpracována v kapitole tři a čtyři. Zde je vytvořen modelový příklad rodinného domu s fotovoltaickou elektrárnou, společně s akumulací energie. Modelové příklady jsou vytvořeny dva. Oba jsou navrženy tak, aby mohly čerpat dotaci z programu Nová zelená úsporám.

Klíčová slova

Obnovitelné zdroje energie, akumulace energie, solární elektrárna, akumulátor, Nová zelená úsporám, PV*SOL.

Abstract

The master theses is focused on description of current problems related to the increasing integration of renewable energy sources into the Czech power grid. One of the main solutions for integrating more of intermittent sources is the use of energy storage. This is noted by the state program of the Ministry of the Environment – Nová zelená úsporám, which provides subsidies for solar power plants on the roofs of residential buildings in the Czech Republic. The subsidy is provided only in case of installation together with the energy storage.

The first two chapters of the theses generally describe the technologies available for energy storage and their potential benefits.

The practical part is elaborated in chapters three and four. There is created a model example of a family house with a photovoltaic power plant together with energy accumulation system. Two models are created. Both are designed to benefit from the program Nová zelená úsporám.

Key words

Renewable energy sources, energy accumulation, solar power plant, battery storage, Nová zelená úsporám, PV*SOL.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 23.5.2018

Jiří Mareš

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Jaroslavu Holému za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Děkuji také konzultantovi Ing. Vladimíru Kučeravému za jeho profesionální rady a čas, který mi věnoval.

Děkuji své rodině za jazykovou korekturu mé diplomové práce a především za veškerou podporu poskytnutou při celé délce mého studia.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD.....	10
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	11
1. AKUMULACE ENERGIE	13
1.1 SYSTÉMY AKUMULACE ENERGIE	15
1.1.1 Elektrické systémy akumulace energie (EEST):	16
1.1.2 Chemické systémy akumulace energie (CEST).....	18
1.1.3 Mechanické systémy akumulace energie (MEST)	20
1.2 PŘÍNOSY AKUMULAČNÍCH SYSTÉMŮ V SÍTÍCH NÍZKÉHO NAPĚTÍ.....	22
1.2.1 Integrace malých decentralizovaných OZE.....	23
1.2.2 Kvalita elektrické energie	24
1.2.3 DC mikrosítě.....	24
1.2.4 Pokrývání výkonových špiček a regulace frekvence	25
2. POROVNÁNÍ TECHNOLOGIÍ UKLÁDÁNÍ ELEKTRICKÉ ENERGIE DO ELEKTROCHEMICKÝCH BATERIÍ A VODÍKU	26
2.1 ELEKTROCHEMICKÉ BATERIE.....	26
2.1.1 Parametry elektrochemických baterií	27
2.1.2 Typy nepoužívanějších sekundárních baterií.....	31
2.1.3 Orientační přehled vybraných akumulátorů.....	37
2.2 VODÍK.....	38
2.2.1 Výroba	39
2.2.2 Skladování.....	41
2.2.3 Energetické využití	41
2.2.4 Obnovitelné zdroje energie.....	42
2.2.5 Bezpečnost	42
2.2.6 Výhody a nevýhody.....	43
2.3 VYHODNOCENÍ POUŽITÍ ELEKTROCHEMICKÝCH BATERIÍ A VODÍKU	43

3. MODELOVÝ PŘÍKLAD FVE S AKUMULACÍ	45
3.1 FVE BEZ AKUMULACE ENERGIE	45
3.1.1 <i>Negativní vlivy FVE bez akumulace energie</i>	46
3.2 FVE S AKUMULACÍ ENERGIE.....	48
3.2.1 <i>Nová zelená úsporám</i>	49
3.3 MODELOVÝ PŘÍKLAD	52
3.3.1 <i>Komponenty solární elektrárny</i>	56
3.3.2 <i>Celkové náklady</i>	59
4. VYHODNOCENÍ POUŽITÍ AKUMULAČNÍ TECHNOLOGIE A VÝVOJ ENERGETICKÉHO TRHU ČR DO BUDOUCNA	60
4.1 VYHODNOCENÍ MODELOVÉHO PŘÍKLADU V RÁMCI DOTAČNÍHO PROGRAMU NZÚ V PODOBLASTI PODPORY C.3.4 – FVE S TEPELNOU AKUMULACÍ PŘEBYTKŮ ENERGIE DO VODY	61
4.2 VYHODNOCENÍ MODELOVÉHO PŘÍKLADU V RÁMCI DOTAČNÍHO PROGRAMU NZÚ V PODOBLASTI PODPORY C.3.6 – FVE S AKUMULÁTOREM.....	64
4.3 VÝVOJ ENERGETICKÉHO TRHU ČR DO BUDOUCNA	67
ZÁVĚR	70
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	72

Úvod

Na snižování emisí CO₂ je dnes kladen v celé Evropské unii velký tlak. Emise skleníkových plynů jsou spojovány s klimatickými změnami na planetě Zemi. Jako možnost snížení těchto emisí se jeví postupné nahrazování fosilních zdrojů obnovitelnými zdroji energie (OZE). Se začleňováním čím dál většího množství intermitentních OZE do elektrizační soustavy (ES) je ale spojena spousta problémů.

Mezi hlavní problémy spojené s OZE s kolísavou výrobou patří jejich závislost na počasí. Výroba solárních a větrných elektráren je těžko predikovatelná a nestálá. Dále jsou tyto výroby obtížně regulovatelné a veškerá vyráběná energie je dodávána okamžitě do sítě. Jako možné řešení problémů vznikajících spolu s vysokou penetrací těchto OZE se jeví akumulace elektrické energie.

V diplomové práci se v první kapitole zaměřuji na popis jednotlivých možností akumulace energie. Ve druhé kapitole porovnávám, z mého pohledu, dvě nejslibnější technologie pro ukládání elektrické energie. Těmi jsou akumulace do elektrochemických baterií a vodíku. Ve třetí, hlavní kapitole diplomové práce, zpracovávám modelový příklad rodinného domu s instalovanou fotovoltaickou elektrárnou a akumulací energie. Ten se nachází v jižních Čechách v obci Zahájí. Vytvářím dva modelové příklady v rámci dotačního programu Ministerstva životního prostředí (MŽP) – Nová zelená úsporám (NZÚ). První model je fotovoltaický systém s tepelným využitím přebytků energie do ohřevu teplé užitkové vody v podoblasti podpory C.3.4. Druhý model je fotovoltaický systém s akumulací elektrické energie do elektrochemických baterií v podoblasti podpory C.3.6. Ve čtvrté a poslední kapitole vyhodnocuji oba modelové příklady a uvádím možný vývoj energetického trhu v České republice do budoucna.

Oba modely jsou vypracovány s cílem vytvoření určitého přehledu o výhodách/nevýhodách možnosti výstavby fotovoltaických elektráren (FVE) s akumulací energie na střeších rodinných domů.

Seznam symbolů a zkratk

Značka	Veličina	Jednotka
E	Elektrická energie	J
C	Elektrická kapacita	F
C_{bat}	Kapacita baterie	kWh
η_{bat}	Účinnost baterie	%
U	Elektrické napětí	V
U_n	Jmenovité napětí	V
L	Vlastní indukčnost	H
I	Elektrický proud	A
I_n	Jmenovitý proud	A
ω	Úhlová rychlost	rad ⁻¹
m	Hmotnost	kg
g	Gravitační zrychlení	m/s ²
$h_{horní}$	Výška horní nádrže	m
$h_{spodní}$	Výška spodní nádrže	m
$U_{(1)}$	Sousledná složka napětí	V
$U_{(2)}$	Zpětná složka napětí	V
P	Činný výkon	W
Q	Jalový výkon	VAr
$\cos\varphi$	Účinník	-
T	Teplota	°C

OZE Obnovitelné zdroje energie

ES Elektrizáční soustava

NZÚ Nová zelená úsporám

MŽP Ministerstvo životního prostředí

FVE Fotovoltaická elektrárna

DoD Depth of discharge (hloubka vybití)

SoC	State of charge (stav nabití)
MPP	Maximum power point (bod maximálního výkonu)
DC	Direct current (stejnoseměrný proud)
AC	Alternating current (střídavý proud)
EEST	Electrical energy storage technologies
CEST	Chemical energy storage technologies
MEST	Mechanical energy storage technologies
SCES	Super capacitor energy storage (supravodivá cívka)
EDLC	Electric double layer capacitor (elektrický dvouvrstvý kondenzátor)
SMES	Superconducting magnetic energy storage (supravodivá cívka)
PVE	Přečerpávací vodní elektrárna
CAES	Compressed air energy storage (energie ve stlačeném vzduchu)
NN	Nízké napětí
VN	Vysoké napětí
LFP	Lithium železo fosfát
VRB	Vanadium redox battery (vanadium redoxní baterie)
REDOX.....	Redukce/oxidace
Ni-MH.....	Nikl-metal hydrid
ZnBr	Zinc-bromide
PSB.....	Polysulfide-bromide battery (polysulfid-bromový akumulátor)
UPS	Uninterruptible power source (zdroj nepřerušovaného napájení)
NZÚ.....	Nová zelená úsporám
NT.....	Nízký tarif
VT.....	Vysoký tarif
ERÚ.....	Energetický regulační úřad
TÚV.....	Teplá užitková voda
CES 2018	Customer Electronics Show 2018
BNEF	Bloomberg New Energy Finance
NTC.....	Výzkumné centrum – Nové technologie

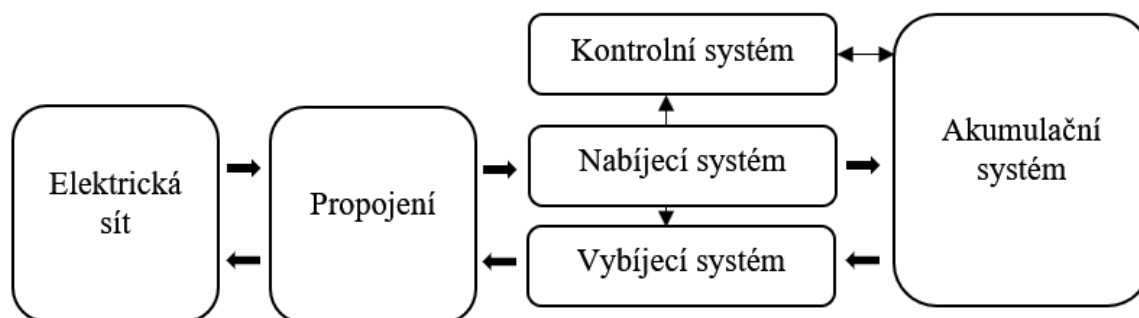
1. Akumulace energie

Základní vlastností elektrické energie je, že ji nelze jednoduše skladovat. Vzhledem k její omezené možnosti skladování bylo vždy nejefektivnějším způsobem provozu elektrizační soustavy pokrývat aktuální poptávku odpovídající nabídkou. Celosvětovým tlakem na snižování emisí vypouštěných do ovzduší dochází k začleňování čím dál tím většího množství obnovitelných zdrojů do ES. Skleníkové plyny jsou spojeny s globálním oteplováním. Zde mohu zmínit Čínu, jako největšího světového znečišťovatele. Čína investuje obrovské množství financí na vyřešení problému znečištěného ovzduší ve svých městech a v oblasti výroby OZE i technologií pro akumulaci energie začíná být světovým lídrem.

Obnovitelné zdroje energie musí být zatím dotovány, aby byla umožněna jejich ekonomická návratnost. Máme zde spoustu dalších konvenčních způsobů, pomocí nichž lze vyrábět elektrickou energii levněji, nicméně při jejich provozu je do ovzduší uvolňováno velké množství škodlivin a skleníkových plynů.

OZE jsou legislativou určeny jako primární zdroje energie, proto jsou v pokrývání spotřeby prioritně nasazovány. Mezi jejich největší nevýhody patří jejich omezená regulovatelnost a proměnlivá výroba elektrické energie, která je přímo závislá na klimatických podmínkách. V energetické strategii Evropské unie pro rok 2030 (2030 Energy Strategy) je definován cíl snížit emise skleníkových plynů o 40 % v porovnání s rokem 1990, nejméně 27 % podíl pokrytí spotřeby z OZE a nejméně 27 % zlepšení energetické účinnosti [2]. Z těchto informací lze usoudit, že obnovitelné zdroje energie budou v EU dále začleňovány do ES a budou mít stále větší podíl na celkové vyráběné energii. Aby začlenění bylo realizovatelné a nedošlo k ohrožení stability sítě, je potřeba vyřešit otázku akumulace energie.

Regulaci sítě zatím řeší špičkové zdroje energie, které jsou schopné v případě potřeby rychle dodat požadované množství chybějící elektrické energie. Do této skupiny zdrojů patří hlavně paroplynové a přečerpávací elektrárny. Další možností regulace je obchodování energie s ostatními státy v propojené elektrizační soustavě. Tato varianta může být ale velice drahá a nelze na ni spoléhat. Pokud například bude v zimním období silný mráz a energie nedostatek, ceny za nakoupenou MWh budou násobně vyšší, než jsou za běžných podmínek. Zde je prostor pro nasazení technologií akumulace energie.

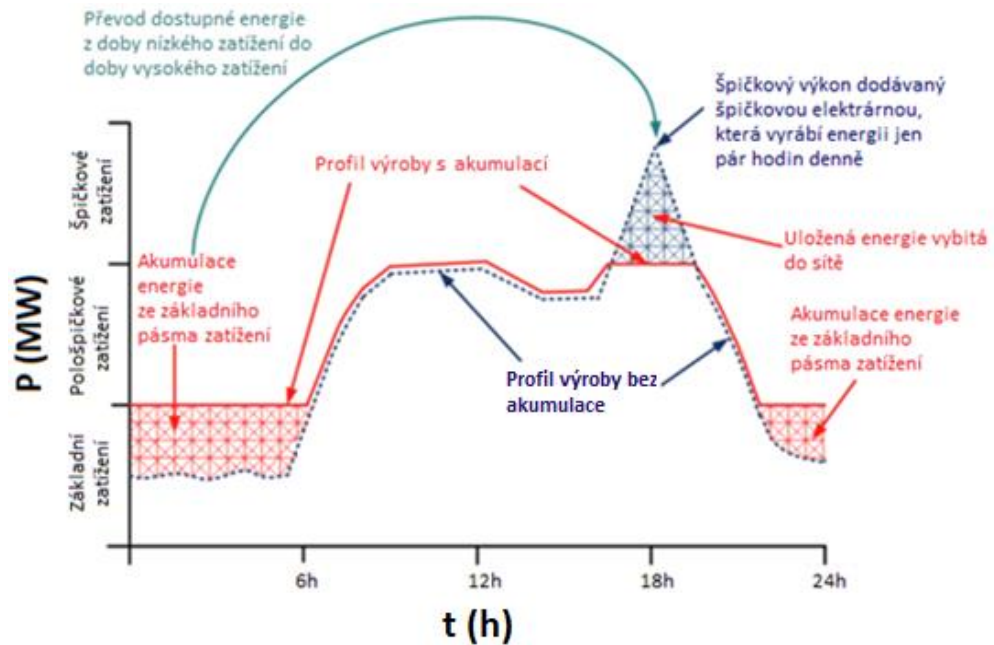


Obr. 1.1 Obecné schéma systému pro ukládání energie

Systém pro ukládání elektrické energie obsahuje prostředky, kterými je energie z elektrizační soustavy převedena do formy, která může být ukládána mimo špičku poptávky nebo v době přebytku energie. Za těchto podmínek je její cena obvykle nízká. V době špiček poptávky je akumulovaná energie přeměněna zpět na elektrickou a dodána do sítě. Každý systém pro akumulaci energie je složen ze čtyř základních komponentů (Obr. 1.1): akumulací systém – do akumulacího systému je energie ukládána (například sekundární baterie), nabíjecí systém – tato jednotka zajišťuje tok energie z elektrické sítě do akumulacího systému, vybíjecí systém – tato jednotka zajišťuje tok energie z akumulacího systému do elektrické sítě, kontrolní systém – řídí celý proces ukládání a vybíjení energie.

Akumulace energie obecně přináší elektrizační soustavě následující výhody. Vyrovnání denního diagramu zatížení – ořezání špiček zatížení, zmírnění přerušované výroby obnovitelných zdrojů energie, zlepšení stability a kvality dodávané energie, snížení investic do elektrických vedení, pomoc při realizaci chytrých sítí, omezení nákupu drahé energie ze zahraničí, zachování dodávky energie při výpadku části sítě – ostrovní provoz.

Obr. 1.2 ukazuje úlohu velkokapacitního systému akumulace energie při základním, pološpičkovém a špičkovém zatížení ES v různých denních dobách. Akumulace energie v tomto systému ořezává výkonovou špičku a tím šetří finance, které by jinak musely být vydány na provoz špičkové elektrárny. Systém také přispívá k udržování kvality napětí, frekvence sítě a omezuje přenosové ztráty na vedení.



Obr. 1.2 Denní diagram zatížení s použitím akumulace energie [4]

1.1 Systémy akumulace energie

Bylo objeveno mnoho nejrůznějších způsobů, jak skladovat elektrickou energii. V následující kapitole budu popisovat technologie potenciálně využitelné pro elektrizační soustavu, přičemž dle principu ukládání energie můžeme systémy rozdělit následovně:

- Elektrické systémy akumulace energie
 - Kapacitory (CS) / Super kapacitory (SCES)
 - Supravodivé cívky (SMES)
- Chemické systémy akumulace energie
 - Elektrochemické baterie
 - Vodík + palivové články
- Mechanické systémy akumulace energie
 - Setrvačníky
 - Přečerpávací vodní elektrárny (PVE)
 - Akumulace energie do stlačeného vzduchu (CAES)

1.1.1 Elektrické systémy akumulace energie (EEST):

Zkratka EEST vychází z anglického (Electrical energy storage technologies), jde o přímé uložení elektrické energie. Pro běžné použití v elektronice se jedná o velice malé úložné kapacity a výkony, které jsou zajištěny pomocí kondenzátorů. Ty však nejsou schopny poskytovat větší výkon po delší dobu. Jediné technologie potenciálně využitelné v energetice jsou superkapacitory (SC) a supravodivé cívky (SMES).

- **Superkapacitory (SCES)**

Klasický kapacitor (kondenzátor) ukládá elektrickou energii ve formě elektrostatického pole a to tak, že mezi deskami kondenzátoru je udržován elektrický potenciál, díky nahromadění kladného náboje na jedné desce a záporného náboje na druhé desce kondenzátoru.

$$E = \frac{1}{2} CU^2 \quad (1.1)$$

V rovnici (1.1) je popsán vztah pro celkovou energii uloženou do kapacitoru. Vidíme, že uložená energie je přímo úměrná velikosti kapacity kondenzátoru a úměrná druhé mocnině jeho napětí.

Superkondenzátory SCES (z anglického Super capacitor energy storage) lze dle principu fungování rozdělit na dvě základní kategorie. Do první kategorie patří hybridní kondenzátory využívající vratných oxidačně-redukčních reakcí na povrchu elektrody. Elektrická energie je tedy ukládána chemicky a v principu uchovávání jsou blízké elektrochemickým bateriím. Základní materiály pro výrobu elektrod jsou vodivé polymery a oxidy kovů. Dalším typem jsou EDLC (Electric double layer capacitor), které pracují na principu dvojvrstvy. Zde nedochází k žádným chemickým reakcím. Podobně jako u klasických kondenzátorů je náboj k elektrodě vázán pouze elektrostatickou silou. Při výrobě elektrod tohoto typu superkapacitoru se používají různé formy uhlíku s velkým specifickým povrchem.

Superkapacitory svými vlastnostmi vyplňují prázdné místo mezi akumulátory a klasickými kondenzátory a využívají se v aplikacích, ve kterých je potřeba přijmout či dodat velké množství energie v krátkém čase. Ve slaboproudé elektrotechnice jsou používány, jako zálohovací médium fotoaparátů, počítačů a GPS. Uvažuje se o jejich využití v automobilovém průmyslu v kombinaci s elektrochemickými bateriemi, kde by se mohla uplatnit jejich schopnost dodávky velkých proudů v krátkém čase a dlouhá životnost (15-20 let) [3]. Mezi další výhody patří jejich vysoká účinnost 84-97 %, počet cyklů více

než 100 000, výroba z netoxických materiálů a velký rozsah pracovních teplot [5]. Pro použití jako akumulace v ES jim brání především vysoké procento denního samovybití, vysoká cena a dále pak malá hustota energie, která se pohybuje o řád níže ve srovnání s akumulátory.

V současné době SCES, z hlediska velikosti kapacity, nemohou konkurovat ostatním akumulacím. Při stejných rozměrech superkapacitory pojmu mnohem méně energie, než akumulace do sekundárních baterií či vodíku.

- **Supravodivé cívky (SMES)**

Supravodivé cívky SMES (z anglického Superconducting magnetic energy storage) využívají při akumulaci energie přeměnu elektrického pole na magnetické pole. Proud procházející cívku do ní indukuje magnetické pole. Za normálních podmínek (teplota 20 °C) dochází při průchodu proudu cívku k Jouleovým tepelným ztrátám. Jouleovy ztráty jsou přímo úměrné ohmickému odporu cívky a úměrné čtverci procházejícího proudu. V případě SMES je jejich provoz zajištěn při teplotě blízko -273 °C, kdy cívka přestane klást jakýkoliv odpor procházejícímu proudu. Existují i materiály, pro které efekt supravodivosti nastává při mnohem vyšších teplotách, což je pro nás žádoucí, vzhledem k energetické náročnosti chlazení. Po odpojení cívky od zdroje zůstává energie uložena v magnetickém poli a v případě potřeby může být tato energie zpětně využita.

$$E = \frac{1}{2} LI^2 \quad (1.2)$$

Z rovnice (1.2) vidíme, že velikost uložené energie v supravodivé cívce je přímo úměrná indukčnosti cívky a úměrná druhé mocnině procházejícího proudu.

Supravodivé cívky jsou charakterizovány schopností rychlého uvolnění energie, rychlou reakční dobou v milisekundách, životností až 30 let, vysokou účinností 95-98 % a na rozdíl od sekundárních baterií po několika tisících cyklech plného vybití nedochází skoro k žádné degradaci. Nevýhody SMES jsou vysoká pořizovací cena 10 000 \$/kWh, vysoká míra denního samovybití 15 %, negativní vliv silného magnetického pole na okolí a nutnost chladicího systému [5].

Právě chladicí systém je největším úskalím této technologie. Chlazení je obvykle zajištěno pomocí tekutého hélia nebo dusíku a jde o nejvíce energeticky náročnou část systému, která pak snižuje celkovou účinnost.

Při průzkumu trhu můžeme vidět, že SMES se zřídka komerčně nasazuje. Může být využita jako doplňková technologie k jinému druhu akumulace energie, hlavně díky schopnosti rychle reagovat a v případě potřeby poskytnout rychle veškerou svou energii. Současný vývoj je směřován k nalezení nových materiálů, které by dosahovaly supravodivosti při co nejvyšších teplotách.

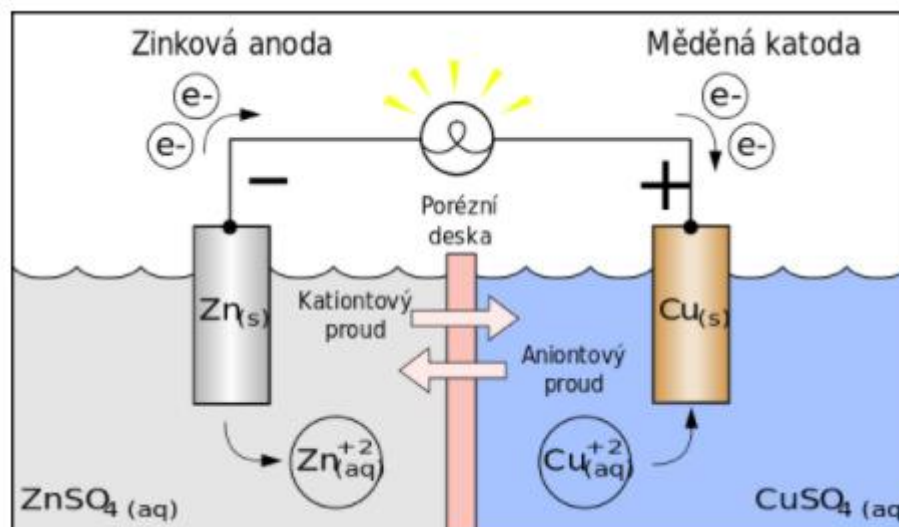
1.1.2 Chemické systémy akumulace energie (CEST)

CEST (z anglického Chemical energy storage technologies) ukládají elektrickou energii do formy chemické energie. Spadají sem všechny typy elektrochemických baterií, které dále dělíme na primární a sekundární články. Primární jsou klasické baterie na jedno použití, tedy po vybití je nelze znovu nabít. Sekundární baterie jsou po jejich vybití schopni znovu nabít a dále cyklicky používat až do konce doby jejich životnosti. Sekundární články označujeme též termínem akumulátorové baterie, akumulátory, nebo sekundární baterie. Další kategorie spadající pod chemické systémy je ukládání elektrické energie do chemické energie vodíku. Elektrickou energii z vodíku jsme schopni dostat zpět pomocí palivových článků.

- **Sekundární články**

Elektrochemických sekundárních článků bylo vymyšleno nespočet druhů, liší se velikostí, kapacitou, životností, měrným výkonem, měrnou hustotou energie, recyklovatelností a mnoha dalšími parametry. Zatím se pro energetiku jako nejpoužitelnější jeví technologie Li-ion a průtokové baterie.

Akumulátorové baterie jsou v principu složeny ze dvou elektrod, elektrolytu a nádoby, ve které jsou tyto komponenty uloženy viz *Obr. 1.3*. Anoda je negativní elektroda, ze které jsou elektrony vylučovány (oxidace) a katoda je pozitivní elektroda, která elektrony přijímá (redukce). Elektrody jsou ponořeny v elektrolytu, který může být pro obě elektrody společný, nebo může mít každá elektroda svůj vlastní. Elektrolyty jsou odděleny membránou (porézní deskou), jež umožňuje průchod iontů. Propojíme-li elektrody vodičem začne na anodě probíhat oxidační reakce a do elektrolytu se uvolňovat kationty a elektrony. Elektrony nedokáží projít přes membránu a putují přes vodivé spojení do katody, kde způsobí redukční reakci kationtů přičemž se na povrchu katody vytváří nová vrstva kovu. V tomto procesu se katoda zvětšuje a anoda naopak zmenšuje. Chemické reakce zapříčiní vznik různých potenciálů na elektrodách, jejichž rozdílem získáváme napětí článku.



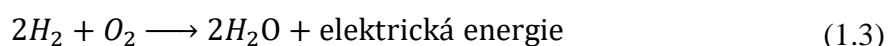
Obr. 1.3 Galvanický článek CuSO_4/Zn [32]

- **Vodík + palivový článek**

Jedná se o technologii ukládání elektrické energie s podstatně nižší účinností (okolo 30 %) oproti akumulátorům a přečerpávacím elektrárnám, ale s potenciálem skladování největšího množství energie. Nevýhoda nízké účinnosti nemusí hrát velkou roli v případech, kdy nadbytečná energie dosahuje na trhu nízké, nebo dokonce záporné hodnoty. Tato situace může nastat například při příznivých větrných podmínkách na severu Německa. V tomto případě nevýhoda nižší účinnosti odpadá, a jak již bylo řečeno do budoucna musíme s tímto scénářem počítat stále častěji, vzhledem k dalšímu začleňování OZE do elektrizační soustavy.

Systémy akumulace energie do vodíku používají dva rozdílné procesy pro ukládání a zpětnou výrobu energie. Produkce vodíku je zajištěna pomocí elektrolýzy vody, vodík je pak skladován ve vysokotlakých nádobách pro pozdější použití. Pokud chceme získat uloženou energii z vodíku zpět, použijeme palivový článek (fuel cell).

Palivové články dokáží přeměnit chemickou energii vodíku a kyslíku (ze vzduchu) na elektrickou energii. Popis této reakce vypadá následovně (1.3).



Během reakce je uvolněna voda, teplo a elektrická energie. Obecně lze říci, že energie generovaná palivovými články je tišší, neprodukuje zplodiny a je účinnější než energie získávaná z fosilních paliv. Problém můžou být katalyzátory palivových článků, pro které jsou používány toxické materiály, na což je třeba dbát při jejich recyklaci.

Akumulace do vodíku je ve fázi vývoje, ale jeví se jako jedna z nadějných variant do budoucna.

1.1.3 Mechanické systémy akumulace energie (MEST)

Elektrická energie u mechanických systémů akumulace MEST (z anglického Mechanical energy storage technologies) je ukládána do kinetické nebo potenciální energie, pomocí motorů (kompresorů a pump). Energie je získávána zpět pomocí generátorů.

- **Setrvačnick**

Setrvačnick ukládají elektrickou energii do kinetické energie otáčející se hmoty rotoru. Podle počtu otáček za minutu můžeme rozlišit vysokootáčkové a nízkootáčkové setrvačnick. Množství uložené energie v setrvačnicku je úměrné momentu setrvačnosti I a druhé mocnině jeho úhlové rychlosti ω .

$$E = \frac{1}{2} I \omega^2 \quad (1.4)$$

V případě válcového rotoru je moment setrvačnosti určen hmotností a poloměrem, úhlová rychlost je limitována mechanickou pevností setrvačnicku. Materiály s nízkou hustotou, avšak dostatečnou pevností, umožňují vyšší rychlosti otáčení. Lze tedy uložit více energie na jednotku hmotnosti/objemu. Vysoká rychlost otáčení je problém hlavně z hlediska tření. Moderní setrvačnick jsou uloženy na magnetických ložiskách a rotor ve vakuu, tak jsou ztráty třením minimalizovány.

Vysokootáčkové setrvačnick mají rotor zkonstruovaný z kompozitních materiálů s karbonovými vlákny a vydrží rychlosti do 100 000 otáček za minutu. Rotory nízkootáčkových setrvačnick jsou konstruovány z oceli s rychlostí do 10 000 otáček za minutu. Hustota energie u nízkootáčkových setrvačnick se pohybuje okolo 5 Wh/kg, u vysokootáčkových okolo 100 Wh/kg. Účinnost je vysoká mezi 90-95 % a životnost více než 15 let. Mezi nevýhody patří vysoké denní samovybíjení a schopnost dodávat energii jen po krátkou dobu [3][5].

Setrvačnick dokáží poskytovat vysoké výkony a jejich reakční čas je v řádu milisekund.

- **Přečerpávací vodní elektrárny (PVE)**

Přečerpávací vodní elektrárna je nejstarší, nejvíce prověřená a nejpoužívanější technologie pro ukládání energie. V přečerpávacích elektrárnách je nainstalováno 95 % z celkové světově

instalované kapacity akumulace elektrické energie. [8]. Princip fungování je velice jednoduchý s účinností 85 % a více než 40 lety doby životnosti [5]. Obecně se vodní elektrárny skládají ze dvou zásobníků vody umístěných v různých výškách. Nádrže mohou být buď přírodního charakteru nebo postaveny uměle. V přečerpávacích elektrárnách ukládáme elektrickou energii do potenciální energie vody, kdy v době přebytku energie v síti přečerpáváme vodu z nižší nádrže do vyšší. Pokud je energii potřeba získat zpět, voda je přepuštěna z horní nádrže přes turbínu zpět do spodní. Turbína je na společné hřídeli s generátorem. Obvykle se používá reverzní Francisovy turbíny, která dokáže fungovat jako pohon pro generátor i jako čerpadlo a spotřebovat tak elektrickou energii.

$$E = mg(h_{horní} - h_{spodní}) \quad (1.5)$$

Rovnice (1.5) popisuje množství uložené energie v přečerpávací elektrárně. Velikost energie je přímo úměrná hmotnosti vody m , gravitačnímu zrychlení g a rozdílu nadmořské výšky horní a spodní nádrže.

V současnosti jsou v České republice 3 přečerpávací elektrárny s celkovým jmenovitým výkonem 1175 MW [9]. Nejnovější a zároveň největší je PVE Dlouhé stráně s instalovaným výkonem 650 MW. Disponuje spádem 510 m a dvěma reverzními Francisovými turbínami o výkonu 325 MW. Druhá přečerpávací elektrárna byla vybudována v souvislosti s výstavbou blízké jaderné elektrárny Dukovany. Jedná se o Dalešice se čtyřmi reverzními Francisovými turbínami a celkovým instalovaným výkonem 480 MW. Třetí PVE Štěchovice II se nachází na Vltavě u Prahy. Je nejstarší a disponuje výkonem 45 MW.

Od doby zapojení většího množství obnovitelných zdrojů do elektrizační soustavy dochází k jejich častějšímu chodu. V současné době hrají pro ES nezastupitelnou roli a převyšují řádově všechny ostatní technologie akumulace v objemu energie, které jsme do nich schopni uložit (Dlouhé stráně dokáží uvolnit veškerou energii během 6-7 hodin při jmenovitém výkonu, to znamená možnost akumulace cca 4000 MWh). Mezi jejich nevýhody patří omezený počet vhodných lokalit, jejich velikost spojená s velkými počátečními náklady a vizuálním dopadem na životní prostředí.

- **Akumulace energie do stlačeného vzduchu (CAES)**

CAES (z anglického Compressed air energy storage) je systém, který ukládá energii do stlačeného vzduchu. Vzduch z okolního prostředí je stlačován do podzemních zásobníků (podzemních jeskyní), kde je uchováván a energie je uložena ve formě potenciální energie

stlačeného vzduchu. V době přebytku elektrické energie, tedy převážně v nočních hodinách, se levná elektrická energie využije k pohonu kompresoru. Kompresory nasají atmosférický vzduch, který je adiabaticky stlačen a uložen pod tlakem 70 barů v podzemním zásobníku. Vzduch se vlivem komprese zahřívá. Ještě před uložením musíme vzduch zchladit, aby se zabránilo přehřátí vzduchotechnických zařízení a zdi podzemního zásobníku. Naopak, když poptávka po energii převyšuje nabídku, je vzduch vypouštěn z jeskyně a přivádí se do spalovací komory, kde se zpět dodá odebrané teplo ztracené při kompresi vzduchu. Směs vzduchu a spalin poté expanduje ve spalovací turbíně, která je na společné hřídeli s generátorem. Ten poskytuje, v době potřeby, energii zpět do sítě.

CAES mají účinnost 54 % a odhadovanou dobu životnosti mezi 20-40 roky [3][5]. Je to použitelná technologie pro velkokapacitní ukládání energie. Objem uložené energie záleží jen na velikosti podzemní jeskyně. Mezi nevýhody patří nalezení vhodného podzemního úložiště pro stlačený vzduch, plýtvání teplem vypouštěním do atmosféry při kompresi vzduchu, spotřeba fosilních paliv a s tím spojené vypouštění emisí při jejich spalování.

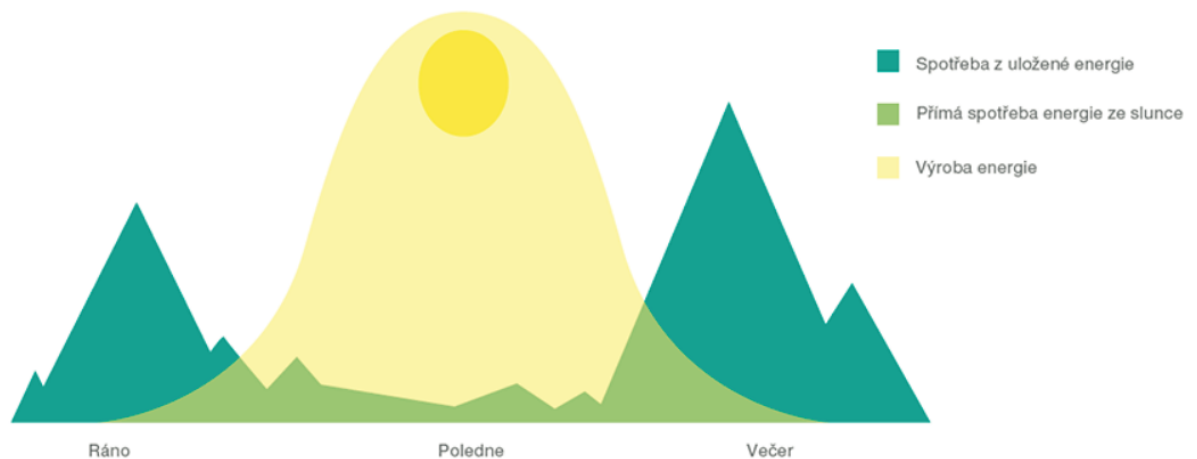
Aktuálně je ve vývoji vylepšená technologie s názvem adiabatický-CAES, která eliminuje potřebu použití fosilních paliv, díky ukládání tepla generovaného při kompresi vzduchu. Tato uložená tepelná energie je pak použita k znovu ohřátí vzduchu při jeho expanzi. Spalovací komora z klasických CAES je nahrazena systémem pro ukládání tepelné energie. Omezení spalování fosilních paliv poskytuje také ekonomickou výhodu úspor za nákup paliva. Nicméně ještě nebyl žádný adiabatický-CAES zdárně zkonstruována, a tak se na něj musíme dívat, jako na neodzkoušenou technologii.

Při úspěšné konstrukci slibuje adiabatický-CAES slibné použití v kombinaci s obnovitelnými zdroji energie. Největší demonstrativní systém je 290 MW elektrárna budovaná v Německu s názvem projekt ADELE, která slibuje vylepšení účinnosti až na 70 % [5][7].

1.2 Přínosy akumulačních systémů v sítích nízkého napětí

V následující části zmíním přínosy, které jsou schopny akumulační systémy obecně poskytovat v síti nízkého napětí (NN). Akumulaci instalujeme pro zlepšení parametrů objektu – zlepšení spolehlivosti a ekonomické stránky.

V distribuční síti nízkého napětí dochází k výrazným změnám, a to především vlivem začleňování malých decentralizovaných zdrojů elektrické energie, jako jsou fotovoltaické elektrárny. Ty jsou nejčastěji umístovány na střechy domů a většinu energie vyrábí okolo poledních hodin, kdy po ní ale není taková poptávka (Obr. 1.4). Řada takových fotovoltaických systémů dodává většinu generované energie přímo do sítě. Dostupný výkon je často velice nestálý a ovlivňuje kvalitu elektrické energie v přilehlém okolí. Pro větší instalované výkony může množství vyráběné energie snadno překročit aktuální odběrovou hodnotu přilehlé lokální sítě, v důsledku čehož dochází k přetokům výkonu do sítí vyšších napěťových hladin. Dalším problémem je měnící se charakter odběrů, kdy domácnosti stále více vykazují kapacitní charakter odběru jalového výkonu, vlivem kondenzátorů na vstupech moderní elektroniky. Fotovoltaické elektrárny samy o sobě vykazují mírně kapacitní charakter, který je dán hlavně použitým NN kabelovým vedením. Problémy vzniklé s kapacitními odběry lze řešit pomocí dekompenzačních tlumivek, nebo vhodně zvolenou kombinací bateriové akumulace a střídače.



Obr. 1.4 Obvyklý profil výroby FVE a spotřeby energie v domácnosti [38]

1.2.1 Integrace malých decentralizovaných OZE

Instalace solárních panelů na střechu obytných domů se jejich majiteli může ekonomicky vyplatit pouze za předpokladu, že je vyrobenou energií schopen sám spotřebovat. Pokud musí energii dodávat do distribuční sítě, výkupní cena za kWh se pohybuje od 0.20 do 0.40 Kč [11].

Spotřebu co největšího množství vlastní energie lze zajistit dvěma způsoby. První je instalace optimální velikosti akumulátorové baterie přímo v objektu s FVE. Druhý by v budoucnu mohl zajišťovat provozovatel distribuční soustavy, kdy by lokálně poskytoval cloudovou službu, ve formě vlastní akumulátorové baterie. Lidé s FVE by tak distributorovi platili určitou sumu

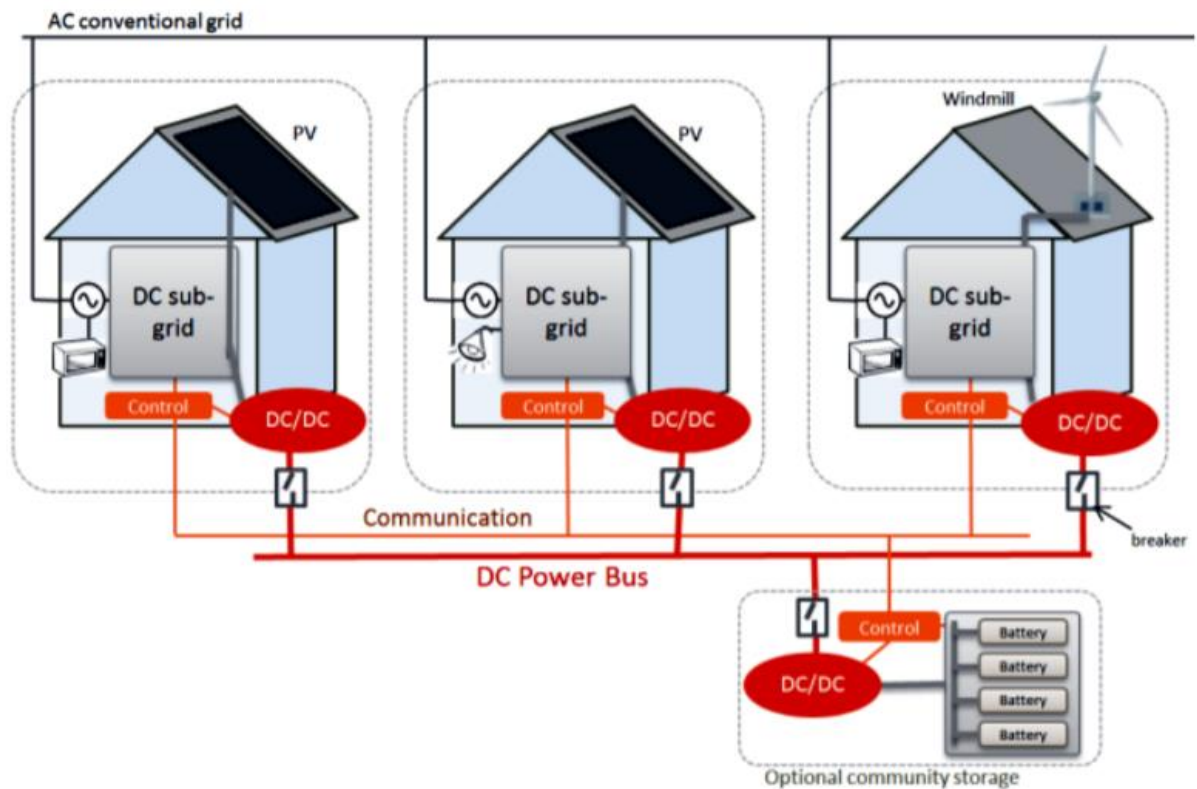
za využívání kapacity jeho akumulátorů, ale ušetřili za instalaci vlastního systému pro ukládání energie.

1.2.2 Kvalita elektrické energie

Některé typy akumulačních systémů přispívají ke zlepšování lokální kvality energie, především technologie využívající DC/AC měniče. Jejich vhodným řízením je možné ovlivňovat parametry, jako jsou vyšší harmonické, nesymetrie, flicker. Pokud systém disponuje čtyřkvadrantovými DC/AC měniči, jsme schopni regulovat velikost napětí a držet ho tak v předepsaných mezích. Regulace napětí je prováděna pomocí spotřebování či dodávky Q (jalového výkonu) s rychlou odezvou. Tímto způsobem jsme také schopni udržovat účinník $\cos\phi$ v požadovaných mezích.

1.2.3 DC mikrosítě

Firma Bosch na největším světovém veletrhu spotřební elektroniky Customer Electronics Show 2018 (CES 2018) prezentovala koncept DC mikro sítí, jako součást projektu budování chytrých měst. Jde o výrobu a sdílení elektrické energie ve stejnosměrné formě, produkované solárními panely, v rámci společné mikrosítě. Prvotní úvaha spočívá v tom, že stále více spotřebičů v domácnostech funguje na DC proud a tento trend dále pokračuje. Elektrochemické akumulátory, pracují také se stejnosměrným proudem. Pokud budeme energii generovanou střešními fotovoltaikami chtít sami lokálně spotřebovat, je zbytečné ji z DC měnit na AC a následně na vstupu elektroniky zase naopak. Na měničích dochází ke zbytečným ztrátám, proto je nejvýhodnější použít přímo energii v DC formě. K zefektivnění systému můžeme dospět sdílením energie pro větší skupinu obytných objektů (mikrosít), která bude doplněna o odpovídající akumulátor (*Obr. 1.5*). Další velký DC spotřebič, který do domácnosti v budoucnu může potenciálně přibýt, je elektrický automobil, jehož nabíjení bude tímto způsobem také efektivnější.



Obr. 1.5 DC mikrosít s akumulací energie [37]

1.2.4 Pokrývání výkonových špiček a regulace frekvence

V případě propojení akumulátorů rezidenčních objektů do virtuálních bloků a možnosti jejich dálkového ovládání, přibývají další užitečné funkce jejich využití. Teoreticky je možné pomocí dostatečného počtu malých akumulátorů udržovat stabilitu celé sítě. Tato možnost je zatím ve vývoji a zmiňuji se o ní dále v mé práci (Sonnen), při popisu tzv. Sonnen Community.¹

¹ Bod 1.2 byl zpracován na základě informačního zdroje [37]

2. Porovnání technologií ukládání elektrické energie do elektrochemických baterií a vodíku

Jako dvě velice zajímavé a rozvíjející se technologie se jeví akumulace energie do elektrochemických baterií a vodíku. V následující části mé práce se zaměřím na podrobnější popis těchto dvou možností.

2.1 Elektrochemické baterie

V posledních letech trh s elektrochemickými akumulátory začal raketově růst. To je způsobeno jejich širokou škálou použitelnosti pro aplikace nejen v energetice, ale také v elektronice a automobilovém průmyslu.

Příroda zná 90 prvků se stabilními izotopy z nichž nejvyšší měrnou energii nabízí pouze lithium a jeho sloučeniny. Proto úvahy o úplně nových zázračných objevech nepřichází v úvahu. Můžeme očekávat technologická zdokonalení a objevy sloučenin lithia s lepšími parametry [27]. Ovšem při průzkumu trhu vidíme, že již dnes lze konstruovat akumulátorové baterie s kapacitou v řádu stovek MWh. Není tedy vyloučeno, že se zanedlouho posuneme ještě o řád výše.

Stále častěji můžeme sledovat kombinaci fotovoltaických panelů spolu s elektrochemickou akumulací energie pro sítě NN. Trend decentralizované výroby elektrické energie nabývá na významu. Německá firma Sonnen, spolupracující také se skupinou ČEZ, nainstalovala po celém světě již přes 26 000 domácích bateriových systémů za použití technologie článků LiFePO_4 [23]. Aktuálně v Německu probíhá testování systému virtuálního propojení rezidenčních akumulátorů instalovaných právě firmou Sonnen. Bateriové systémy německých domácností jsou propojeny přes internet (tzv. Sonnen Community) a pospojovány do virtuálních bloků. Jednotliví obyvatelé země by se tedy v budoucnu mohli podílet i na samotné stabilizaci sítě. Celkový potenciál pro akumulaci energie v rezidenčních objektech je přitom obrovský a za předpokladu ekonomické návratnosti bude využit.

2.1.1 Parametry elektrochemických baterií

- *Kapacita*

Nejzákladnější parametr sekundárních článků je kapacita, udávající množství elektrického náboje, které akumulátor dokáže přenést při jmenovitém napětí. Jako jednotky se udávají ampérhodiny (Ah), tedy při kapacitě 2 Ah dokáže baterie poskytovat proud 2 A po dobu 1 hodiny. Hodnota kapacity baterie je obvykle uvedena pro pokojovou teplotu (20 °C). Na reálnou kapacitu baterie má vliv spousta faktorů. Je třeba znát napětí ke kterému je kapacita vztažena (napětí článku krát počet sériově spojených článků v systému). Účinnost akumulátoru, která se odvíjí od velikosti odebíraného proudu, stárí a použité technologie. V neposlední řadě má na kapacitu sekundární baterie významný vliv teplota prostředí.

Nejpoužívanější jednotky pro množství elektrické energie, které jsme schopni do akumulátoru uložit jsou Watthodiny (Wh), respektive (kWh), (MWh). Pro domácnosti jsou obvykle nabízené Li-ion bateriové soupravy, s moduly o kapacitě 2 kWh, které se jednoduše dají rozšiřovat o libovolný počet těchto modulů, tedy dostáváme se na hodnoty 4, 6, 8 a více kWh úložného prostoru. U lithium-iontových akumulátorů musíme pro zachování životnosti počítat s hloubkou vybíjení max. 80 %, a tak, při instalaci akumulátoru s kapacitou 2 kWh, můžeme reálně počítat s energií pouze 1.6 kWh.

- *Měrný výkon*

Vyjadřuje výkon akumulátoru na jeden jeho kilogram (W/kg). Měrný výkon je dán typem baterie a jejím uspořádáním. Je určen jako podíl množství energie vzniklé při vybíjení baterie konstantním proudem a časem tohoto vybíjení. Energie vyjadřuje množství práce a výkon značí rychlost, jakou je práce prováděna. Měrný výkon tedy vyjadřuje, jak rychle lze získat přístup k energii uložené v baterii.

Akumulátory s velkým měrným výkonem mají schopnost rychlého přístupu k uložené elektrické energii, dokáží tedy dodat velké množství energie během krátkého času.

- *Hustota energie*

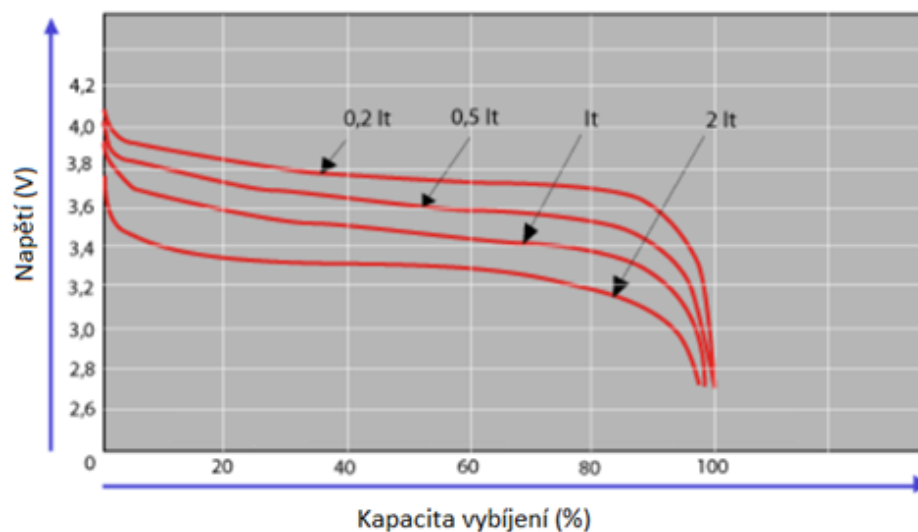
Udáváme ji dvěma způsoby, jako množství uložené energie na jednotku hmotnosti, nebo objemu. Specifická hustota energie je vztažena k hmotnosti (Wh/kg) a objemová hustota energie je vyjádřena v jednotkách (Wh/l).

Tento parametr je velice důležitý hlavně u aplikací pro elektroniku (PC, mobilní telefony), v automobilovém průmyslu a všude, kde hrají rozměry akumulátoru podstatnou roli. Zájem je vylepšovat akumulátory tak, aby měly co nejvyšší hustotu energie a zabíraly tak co nejméně prostoru.

- *Napětí*

Rozdíl potenciálů mezi elektrodami jednoho článku se nazývá jmenovité napětí. Tyto články se spojují buď paralelně, nebo sériově. Při sériovém spojování článků se celkové napětí akumulátoru mění a je nazýváno skutečné napětí. Toto napětí se měří na svorkách sekundární baterie a jeho velikost se v průběhu životnosti mění v závislosti na stavu vybití, okolní teplotě, opotřebení a dalších faktorech.

U některých akumulátorů se udává maximální a minimální hodnota napětí. Pokud by docházelo k přebíjení, či vybití (obvykle pod hodnotu 20 % celkové kapacity), dochází k poškození a snížení životnosti akumulátoru.



Obr. 2.1 Vybíjecí charakteristiky v závislosti na vybíjecím proudu pro Li-ion článek [24]

Na (Obr. 2.1) můžeme vidět závislost napětí Li-ion článku na jeho kapacitě vyjádřené v procentech. Velikost vybíjecího proudu v závislosti na čase je značena I_t . V případě článku s kapacitou 1000 mAh dojde k jeho vybití proudem 1 A za 1 hodinu, při uvažování vybíjecího proudu I_t . Lze také pozorovat, že akumulátor si v rozmezí od 20-80 % vybití drží cca konstantní hodnotu napětí.

- *Energetická účinnost*

Je poměr mezi energií odebranou z akumulátoru během vybíjení a energií dodanou do akumulátoru během nabíjení. U sekundárních baterií je tato účinnost obvykle vysoká, i nad 95 % a je dána elektrochemickou účinností daného akumulátoru.

- *Samovybíjení*

Tento parametr je spojen s vnitřním odporem elektrochemických baterií. Energie z elektrochemických baterií se ztrácí i v případě, že nejsou připojeny na elektrický spotřebič. Množství ztracené energie závisí na typu, chemickém složení, stáří, teplotě a počátečním stavu nabití baterie. Starší, opotřebenější a více tepelně zatěžované akumulátory vykazují větší míru samovybíjení. Výrobci udávají hodnotu samovybíjení v %/měsíc. K nejrychlejšímu samovybíjení dochází, pokud je akumulátor nabit na 100 %. S nižší hodnotou nabití se tento efekt zpomaluje.

- *Rychlost nabíjení*

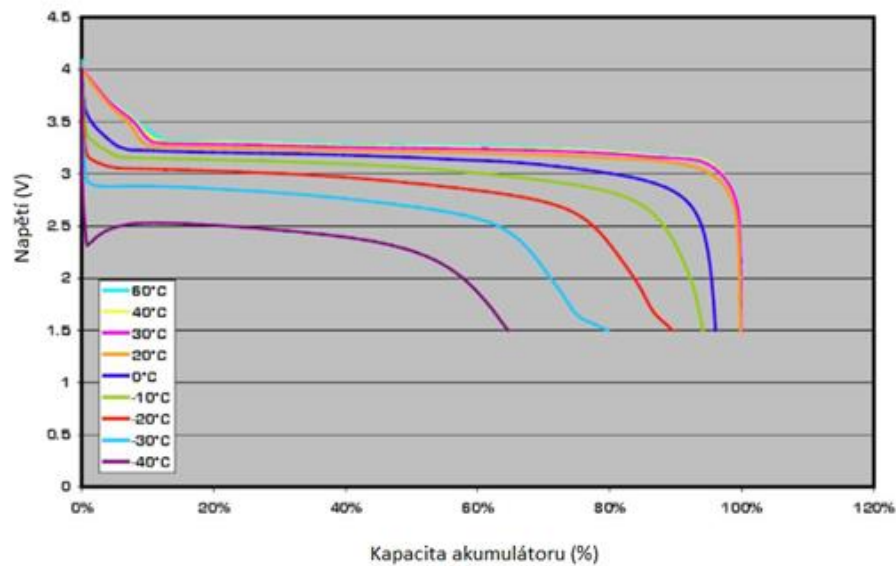
Pro každý typ akumulátoru je stanovena optimální rychlost nabíjení, která je určena tak, aby bylo dosaženo co nejdelší životnosti. Obecně platí, že při rychlejším nabíjení dochází k většímu vývinu tepla a tím i opotřebenění, což je jeden z problémů pro automobilový průmysl, kde se výrobci snaží stlačit rychlost nabíjení na co nejkratší dobu.

- *Velikost vybíjecího proudu*

Jedná se o maximální spojitý vybíjecí proud, který by neměl způsobit poničení ani degradaci elektrochemické baterie. Dále se uvádí špičkový vybíjecí proud, který dosahuje vyšších hodnot než proud spojitý. Tento proud je omezen jen na krátké časové úseky tak, aby nedocházelo k degradaci akumulátoru.

- *Rozsah pracovních teplot*

Teplota má značný vliv na chemické procesy probíhající uvnitř sekundárních baterií. Výrobci jsou udávány provozní teploty, při kterých byly jednotlivé parametry měřeny. Do grafů je pak znázorněn vliv teploty na jednotlivé parametry. Při návrhu akumulátoru musíme tedy počítat s teplotou okolí ve kterém bude provozován.



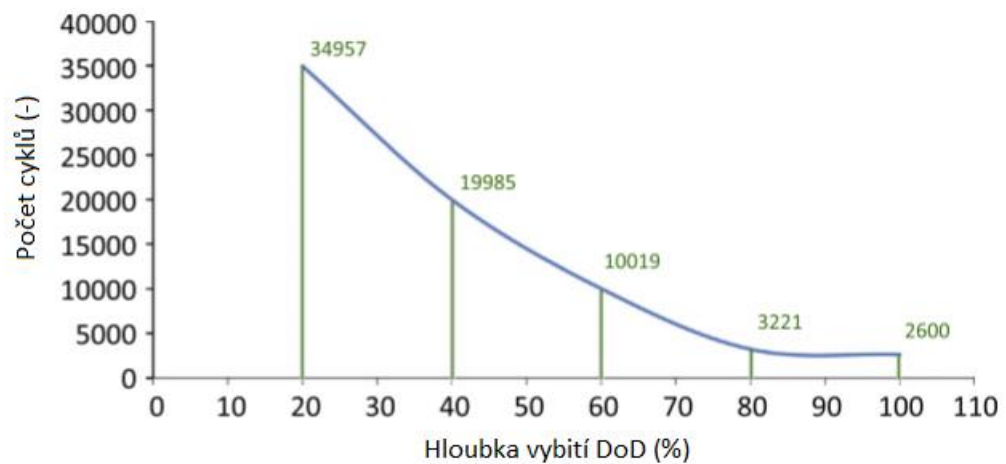
Obr. 2.2 Vybíjecí charakteristika akumulátoru v závislosti na teplotě [25]

Na Obr. 2.2 jsou zobrazeny vybíjecí charakteristiky akumulátoru LiFePO_4 o kapacitě 44 Ah, který je vybiten proudem 9 A, což odpovídá přibližně vybíjecímu proudu $0.2I_t$. Z obrázku je patrný negativní vliv nízké teploty na kapacitu akumulátoru. Na druhé straně při provozu akumulátoru v prostředí s vysokými teplotami nedochází ke snížení jeho kapacity ihned, ale dochází k jeho extrémnímu opotřebování, což časem vede ke snížení celkové kapacity.

- *Životnost*

Jedno nabití a vybití akumulátoru je označováno jako cyklus. Při každém cyklu dochází k malému snížení kapacity, proto mohou být sekundární baterie používány pouze po určité množství cyklů. Jako konec životnosti akumulátoru se obecně považuje snížení jeho jmenovité kapacity na 80 % (někteří výrobci však označují jako konec životnosti, ke kterému vztahují záruku na akumulátor, i jiné hodnoty snížení kapacity a na to si je třeba dát při koupi pozor). Životnost je definována počtem nabíjecích/vybíjecích cyklů po kterých akumulátor dosáhne zmiňovaného poklesu kapacity. Životnost sekundárních baterií se významně liší podle použitého typu a technologie.

Další proměnná, která má významný vliv na životnost, je hloubka vybití (DoD – depth of discharge). Pro lithiové akumulátory se uvádí maximální vybití na 20 % jmenovité kapacity (DoD 80 %). Vybití akumulátorů s DoD menší než 80 % výrazně zvyšuje jejich životnost. Proto se počet cyklů, respektive životnost akumulátoru, vztahuje vždy k určité hloubce vybití a dané provozní teplotě.



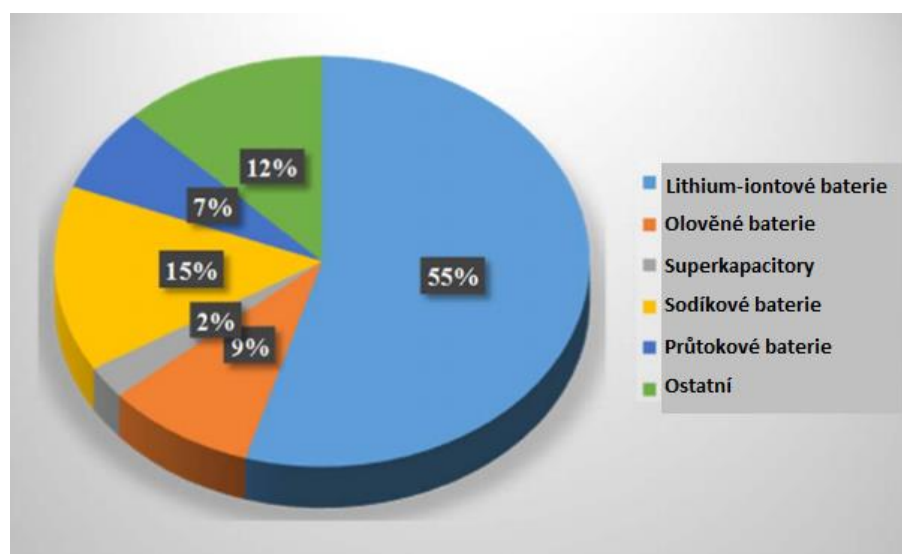
Obr. 2.3 Obecná závislost počtu cyklů akumulátoru na hloubce vybití [26]

V Obr. 2.3 je zobrazena závislost počtu cyklů vzhledem k hloubce vybití. Při nižších DoD pozorujeme výrazný nárůst počtu cyklů sekundární baterie.

Aktuálně nabízené sekundární baterie LiFePO_4 pro akumulaci elektrické energie k rezidenčním účelům firmou Sonnen garantují počet cyklů 10 000, nebo životnost 10 let, při zachování nejméně 70 % jmenovité kapacity [23][31].

2.1.2 Typy nejpoužívanějších sekundárních baterií

Trend nové instalace akumulátorů lze pozorovat v Obr. 2.4. Vidíme, že nově nainstalovanou globální kapacitu v akumulátorových bateriích v roce 2016 ovládla technologie Li-ion.



Obr. 2.4 Nově nainstalované akumulátorové systémy v roce 2016 celosvětově [6]

Akumulátory na bázi lithia (Li):

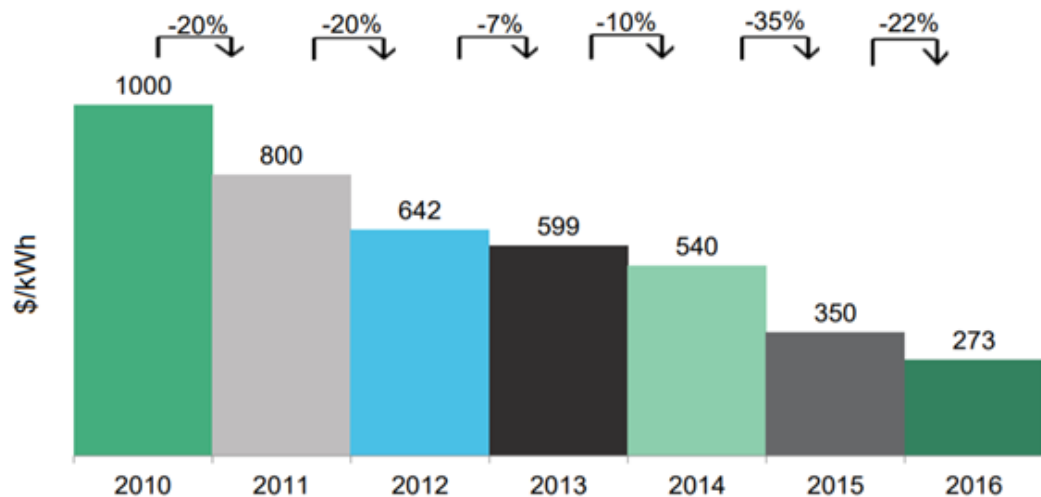
Jak již bylo zmíněno výše lithium je prvek z periodické tabulky se stabilními izotopy a nejvyšší měrnou energií, proto je také nejvíce zkoumaným a využívaným materiálem pro akumulátory. Hmotnost a velikost sekundárních baterií je jeden z hlavních parametrů, zvláště pro elektrické automobily, elektroniku a rezidenční účely akumulace elektrické energie. Pro takové aplikace žádný vhodnější prvek neexistuje.

Je vyvíjeno mnoho typů lithiových akumulátorů. Výrobci stále hledají nejvhodnější sloučeniny pro dosažení těch nejlepších parametrů. Další faktor ovlivňující vznik tolika typů lithiových akumulátorů jsou patenty, které firmy vydávají. Tyto patenty mají platnost několik let, po dobu nichž nesmí bez souhlasu vlastníka nikdo jiný danou patentovou technologii využívat.

Zatím největší zprovozněný bateriový systém v České republice je u obce Mydlovary na Českokbudějovicku. Jde o Li-ion technologii o kapacitě 1.75 MWh, provozovanou firmou E.ON. Ta chce pilotní projekt využít k získání zkušeností z provozu v reálných podmínkách, tedy zkušenosti z výstavby, provozu i připojení [28]. Tyto informace chce E.ON dále využít k diskuzi o legislativních změnách týkajících se akumulátorů, jelikož současná legislativa s takovými zařízeními v ES nepočítá.

Z mnou zkoumaných Li-ion technologií vychází, pro rezidenční akumulaci energie, nejlépe vlastnosti LFP (lithium železo fosfát) akumulátoru. LiFePO_4 články se díky svým vlastnostem rychle rozšířily do téměř všech oblastí průmyslu a staly se běžně dostupnými na trhu. Největší výhodou oproti jiným druhům lithiových akumulátorů je vysoká bezpečnost a podstatně vyšší životnost. Zatím co ostatní druhy lithiových akumulátorů mohou při zkratu či přebíjení vzplanout, nebo dokonce explodovat, u LiFePO_4 je tato reakce téměř vyloučena. Běžný lithium-polymerový či lithium-iontový akumulátor po přibližně 300-1000 cyklech chemicky degraduje a jeho kapacita začíná významně klesat. LiFePO_4 články si ještě po 10 000 cyklech zachovávají 70 % původní kapacity [23]. Tím jsou určeny pro náročné použití k fotovoltaice, elektromobilitě a energetických úložištích, kde i při denním cyklování by měli dosahovat životnosti 15 i více let. Nevýhodou je vyšší hmotnost. U Li-ion a Li-pol článků dosahuje energetická hustota přibližně 120-200 Wh/kg, u LiFePO_4 je rozumný standard 80-100 Wh/kg [5][6]. Tato technologie tedy není vhodná pro letecký průmysl a malé automobily. LiFePO_4 akumulátory mají velmi nízký vnitřní odpor, a proto se dají nabíjet a vybíjet vysokými proudy, aniž by se zkracovala jejich životnost nebo docházelo k přehřívání. Maximální vybíjecí proud

je 10I_t a nabíjecí 3I_t. Článek s kapacitou 100 Ah tedy lze vybíjet proudem až 1000 A a nabíjet proudem 300 A. Nebo jinak, zcela vybitý takovýto akumulátor lze nabít již za 20 minut a celý lze vybit za 6 minut. LFP mají velkou proudovou zatížitelnost a životnost. Napětí jednoho článku je 3.2 V. Jsou bezpečné, odolné vůči dlouhodobějším vyšším teplotám a netoxické. Mohou být citlivé na časté silnější nabíjení. Poškozuje je přebíjení a hluboké vybití.



Obr. 2.5 Vývoj ceny Li-ion akumulátorů v čase [33]

Obr. 2.5 znázorňuje vývoj ceny Li-ion akumulátorů. Můžeme pozorovat každoroční významný pokles ceny, to je dáno velkými investicemi do jejich produkce. K tradičnímu trhu s elektronikou se přidal trh s elektrickými automobily a energetika, což celkově znásobilo investice do Li-ion akumulátorů. Zde znázorněný vývoj cen tvoří pouze cenu akumulátorů samotných, což tvoří přibližně 40 % z celkové ceny instalace akumulčního systému.

Předpověď vývoje cen zpracovaná Bloomberg New Energy Finance (BNEF) říká, že cena Li-ion akumulátorů by se v roce 2030 měla dostat na 74 \$/kWh, což by z ní udělalo velice dostupnou technologii [33].

Průtokové baterie:

Průtokové baterie se začínají využívat pro ukládání energie ve velkých objemech. Elektrochemická energie je u průtokových baterií ukládána do dvou různých elektrolytů viz Obr. 2.7. Nádrž č. 1 slouží jako zásobník negativního elektrolytu a nádrž č. 2 slouží jako zásobník pozitivního elektrolytu. Pomocí čerpadel proudí elektrolyt skrz chemický článek, kde jsou od sebe elektrolyty odděleny membránou a vytváří rozdíl potenciálů. Tato vlastnost je velkou výhodou průtokových baterií, protože elektrolyt můžeme skladovat v neomezeně

velkých zásobnících. Elektrolyt nepodléhá degradaci, a tak má akumulátor skoro neomezený počet nabíjecích/vybíjecích cyklů. Membrána umožňuje průchod iontů a je jednou z částí, která je třeba po čase vyměnit, nicméně výměna membrány není nijak extrémně technicky náročná.

Existuje více druhů průtokových baterií, z nichž nejznámější jsou VRB – Vanad redoxní baterie (Vanadium Redox Battery), ZnBr – Zinko-bromový akumulátor (Zinc-Bromide Battery), PSB – Polysulfid-bromový akumulátor (Polysulfide-Bromide Battery). U vanadium redoxového akumulátoru výrobci deklarují, že elektrody není nutné během jeho životnosti měnit. VRB se jeví v současnosti jako nejperspektivnější průtokový akumulátor, ve světě je budováno mnoho projektů pro ukládání energie z OZE tímto způsobem a jedná se i o projekty v řádu stovek MWh úložného prostoru.

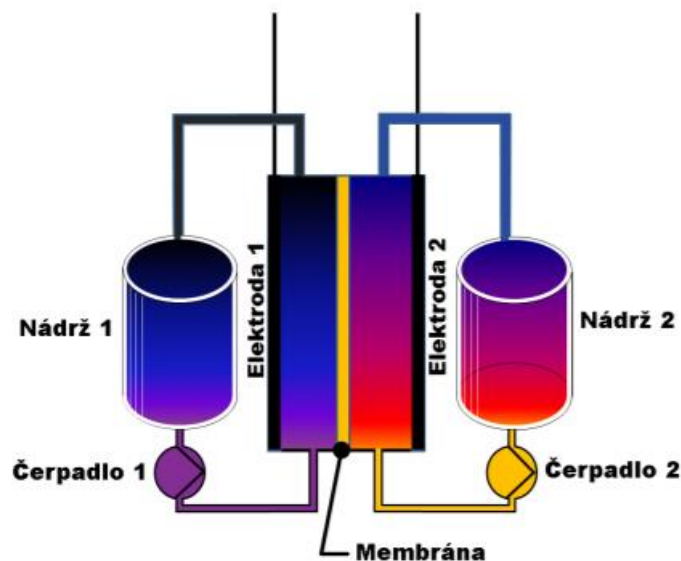
V České republice byl první VRB akumulátor v kombinaci se solární elektrárnou umístěn v Českých Budějovicích v areálu Jihočeského vědeckotechnického parku (Obr. 2.6). Jedná se o akumulátor s kapacitou 130 kWh a výkonem 30 kW [50]. Rozvojem této technologie se zabývá Západočeská univerzita v Plzni ve spolupráci s Ústavem chemického inženýrství Vysoké školy chemicko-technologické v Praze. Ve výzkumném centru – Nové technologie (NTC) v Plzni je vyvíjen VRB akumulátor s vylepšenými vlastnostmi [30]. Na obou zmiňovaných místech jsem se byl osobně podívat a konzultoval jsem VRB technologii s místními experty. Do budoucna počítám s jejím silným rozvojem.



Obr. 2.6 Vanad redoxní průtoková baterie JVTP v Českých Budějovicích

Termín REDOX u VRB akumulátorů znamená chemickou reakci oxidace a redukce využívanou pro ukládání a následné zpětné uvolňování elektrické energie. Roztok elektrolytu u VRB se skládá z izotopů vanadu, které jsou rozpuštěné v kyselině sírové. Vanad je recyklovatelný. Akumulátory se mohou bez poškození zcela vybit. Jmenovité napětí jednoho článku je 1.6 V.

Nevýhodou všech průtokových baterií je nízká specifická hustota energie (25 Wh/kg), díky čemuž vyžadují více prostoru pro instalaci. Operují s nižší účinností 80 %. S velikostí jsou spojeny i určité problémy při transportu systému do místa instalace.



Obr. 2.7 Schéma průtokové baterie VRB [29]

Olověné akumulátory (Pb):

Jedná se o první elektrochemický akumulátor nasazený do komerční výroby. V dnešní době je stále velice populární zejména díky nízké ceně a dostupnosti přesných dat o životnosti a funkčnosti, které jsou reálně prověřeny v provozu. Uplatnění nacházejí zejména jako záložní zdroj napájení v elektrárnách a rozvodnách (UPS), kde měly roky nezastupitelnou funkci [6]. Dále jako startovací akumulátory, díky schopnosti dodávat vysoké proudy.

Jmenovité napětí článku je 2 V. Zápornou elektrodu v nabitěm stavu tvoří houbovitě olovo, u kladné elektrody je to oxid olovičitý. Elektrolytem v olověných akumulátorech je vodou zředěná kyselina sírová o koncentraci cca 35 % objemu u nabitěho akumulátoru. K jejich výhodám patří malé hodnoty denního samovybití (<0.3 %), relativně vysoká účinnost (63-90 %) a hlavně nízké počáteční náklady na pořízení (50-600 \$/kWh) [5].

Mezi nevýhody patří nízká specifická hustota energie, pomalé nabíjení (při rychlém nabíjení dochází k poškozování akumulátoru), musí být skladovány v nabitém stavu, nízký počet nabíjecích/vybíjecích cyklů, vysoká hmotnost a samotné olovo patří mezi těžké kovy, toxické pro životní prostředí.

Olovené akumulátory jsou desetiletí odzkoušenou technologií a nelze zde očekávat žádný velký pokrok, tedy pro OZE s nimi v budoucnu nepočítám.

Nikl-kadmium akumulátory (Ni-Cd)

Ni-Cd sekundární baterie se začaly používat v polovině 20. století v železniční dopravě. Léta byly umísťovány do většiny spotřebičů, kde byl klíčový parametr vysoká kapacita. Jejich výhody jsou možnost skladování ve vybitém stavu, vysoká spolehlivost, možnost odběru vysokých proudů, malý vnitřní odpor, velký rozsah pracovních teplot, možnost rychlého nabití a velice dobrá mechanická odolnost.

Mezi nevýhody patří nižší energetická hustota ve srovnání s lithiovými akumulátory, paměťový efekt, vysoká míra samovybíjení, nižší jmenovité napětí článku a vysoká toxicita kadmia (jeho recyklace je nákladná). V ČR dle zákona č. 297/2009 Sb. vyplývá omezení použití NiCd akumulátorů pro komerční účely. Toto je dáno právě vlivem toxicity kadmia.

Nikl-metal-hydrid akumulátory (Ni-MH)

V 80. letech 20. století si tento typ akumulátorů prošel přelomovým obdobím, kdy byl vyřešen problém s nestabilitou chemického složení. Disponují až o 40 % vyšší energetickou hustotou než Ni-Cd a to bez obsahu toxických materiálů.

Jejich nevýhodou je vysoká míra samovybíjení a nízké jmenovité napětí článku 1.2 V. Pro dosažení stejného výkonu jako u lithiových akumulátorů při konstantním proudu, je třeba 3krát více článků.

Kov-vzduchové akumulátory (metal-air):

Potřebují pouze jednu kovovou elektrodu na článek, druhá elektroda je proudící vzduch, respektive kyslík v něm obsažený. Nejsou nijak toxické a kovy použité pro elektrodu (zinek, lithium, hliník, hořčík) jsou snadno recyklovatelné.

Jedná se o technologii ve fázi raného vývoje, se kterou je spojena spousta nevyřešených problémů. Zejména problémy s nízkou účinností článků, častou potřebou výměny kovové

elektrody a náchylnosti na změny podmínek okolního vzduchu (vlhkost, teplota, obsah nečistot).

Sodíkové akumulátory:

Rozeznáváme dva druhy těchto sekundárních baterií, a to Sodíkovo-niklová (Sodium-nickel-chloride) a Sodíkovo-sírová (Sodium-sulfur). Vyznačují se velice vysokými provozními teplotami okolo 320 °C. Ochranná nádoba, která musí dokonale izolovat a chránit proti úniku sodíku, je náročná na konstrukci. Mezi výhody patří možná vysoká hustota energie a dlouhá doba životnosti.

Nevýhoda je vysoká pořizovací cena, spojená s velkými nároky na bezpečnost systému.

2.1.3 Orientační přehled vybraných akumulátorů

Tab. 2.1 Orientační přehled vybraných vlastností používaných akumulátorů [3][5][6][31][33][34][35][39]

Parametr	Veličina	Olověné	Lithium-ion	Redox Flow	Superkapacitor	Sodíkové
Náklady na výkon	\$/kW	310	650	1250	4400	4400
Náklady na kapacitu	\$/kWh	310	800 ⁽²⁾	310	52 000	625
Celková účinnost	%	60-70	85-92	60-80	97	70-85
Životnost	Cykly	2000	6 000+	20 000+	1 000 000	4500
Reakční doba	(s)	<1	<1	<30	<0.1	<1
Degradace	%/rok	5-7	1.5-5	0	0	0.5
Mobilita	Ano/Ne	Ano	Ano	Ne	Ano	Ne
Teplotní odolnost	°C	25	30	45	35	300

⁽²⁾ V tomto případě uvažuji Li-ion akumulátory pro rezidenční účely s celkovou kapacitou systému v řádu jednotek kWh. Při pořízení akumulátorů s kapacitou v řádu MWh se s celkovou cenou systému dostaneme podstatně níže. V ceně je již zahrnuto veškeré příslušenství potřebné k instalaci spolu s akumulátorem (battery management system).

2.2 Vodík

Termín vodíkové hospodářství zavádím pro systém popisující soubor komplexních technologických operací a činností, při nichž hlavní roli akumulčního media hraje vodík. Tyto činnosti zahrnují generování vodíku, skladování, dopravu a následné zpětné získání energie. Cílem je obecné uspokojení energetických potřeb, ať už mluvíme o spalování vodíku v motorech vozidel, či jeho akumulaci pro následnou zpětnou výrobu elektrické energie.

Vodík je nejlehčí plynný chemický prvek. V periodické tabulce se nalézá na prvním místě a tvoří převážnou část hmoty ve vesmíru. Je to bezbarvý, lehký plyn bez chuti a zápachu. V chemické tabulce prvků se značí *H* (hydrogenium). Za normálních podmínek tvoří molekuly o dvou atomech. Má malou rozpustnost v kapalných rozpouštědlech, ale lze ho rozpouštět v některých kovech. Je to velmi reaktivní prvek, s řadou prvků a sloučenin reaguje bouřlivě. Je schopný se přirozeně slučovat s kterýmkoli prvkem z periodické tabulky kromě vzácných plynů. Většinou nereaguje samovolně, pro reakci potřebuje určitou vstupní energii. Je hořlavý a hoří namodralým plamenem. Jeho hmotnost je 14krát nižší a teplo vede 7krát lépe než vzduch [12]. Molekuly vodíku jsou tak malé, že prostupují většinou materiálů, což je jeden z problémů při jeho skladování.

V současné době se o vodíku mluví, jako o palivu budoucnosti. Vodík se však ve využitelné formě pro spalování, či jako palivo pro palivové články, v přírodě volně nevyskytuje. Je ho zde ale dostatek vázaného ve sloučeninách. Existuje více způsobů výroby vodíku, při kterých dodáme energii, kterou jsme v omezené formě schopni získat zpět. Může sloužit jako nosič čisté energie, který při výrobě a spotřebě nevypouští do ovzduší žádné škodliviny, pokud je splněn předpoklad výroby elektrické energie z OZE. Pro výrobu vodíku se využívá elektrolýza vody a následně je elektrická energie znovu vyráběna pomocí palivových článků.

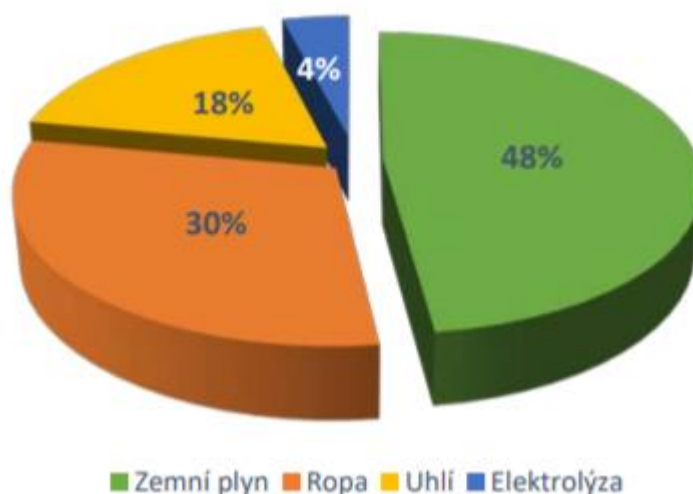
Vodík jako palivo bude mít také nezastupitelnou úlohu v automobilovém průmyslu. Přes investice v automobilovém průmyslu by se pak mohl dostat jednodušeji i do energetiky, jako medium pro akumulaci energie z OZE. Náznak toho, že vodík v budoucnu bude nabírat na významu, poskytuje celosvětový průzkum KPMG Global Automotive Executive Survey, jehož se zúčastnilo více než 900 respondentů z řad vrcholných představitelů automobilového průmyslu. Šéfové automobilek předpokládají, že v roce 2040 budou na silnicích rovnoměrně zastoupeny různé druhy pohonů a to: z 26 % akumulátory poháněné vozy, z 25 % automobily na vodík, 25 % vozů se spalovacím motorem a 24 % hybridů [13]. Většina

respondentů se domnívá, že největší překážkou pro rozvoj elektrických vozů s akumulátory bude chybějící infrastruktura, a proto neuspějí tak, jak se dnes očekává.

2.2.1 Výroba

Prostředky pro akumulaci elektrické energie by měly být dobře dostupné a globálně rozšířené, aby nebylo nutné je dopravovat na velké vzdálenosti. Zároveň by ideální zdroj energie měl být nejlépe nevyčerpatelný a ekologicky šetrný. Těmito parametry vodík disponuje. Voda, případně biomasa v nejrůznějších formách (dokonce i komunální odpad, odpad z potravinářského průmyslu), nebo i další zdroje vodíku, jsou dostupné téměř kdekoli v dostatečném množství.

V současné době je nejlevnější výroba vodíku z fosilních paliv. Jeho průmyslová výroba se realizuje hlavně parním reformingem zemního plynu. Vzniká při parciální oxidaci ropných frakcí a zplyňováním uhlí. Pouze 4 % celosvětové produkce připadá na elektrolýzu vody (Obr. 2.8). Elektrolýza je ze zmiňovaných způsobů výroby nejdražší, ale jsme schopni získat naprosto čistý vodík bez vypouštění emisí do okolí.



Obr. 2.8 Globální produkce vodíku jednotlivými technologiemi [16]

- *Elektrolýza vody*

Jedná se o způsob výroby vodíku, kdy je voda štěpena na kyslík a vodík pomocí elektrické, případně kombinací elektrické a tepelné energie. Je to proces, při kterém dochází k rozkladu roztoku působením stejnosměrného elektrického proudu. Tento proces je popsán v následující rovnici (2.1).



Proud přiváděný do roztoku pomocí elektrod, způsobuje na elektrodách redoxní reakce. Voda je polární rozpouštědlo, které má schopnost odloučit částice vázané polárními vazbami v molekulách. Tyto části se pak rozptýlí po roztoku jako kladné a záporné ionty. Elektrolytem může tedy být například sůl (chlorid sodný) rozpuštěná ve vodě, nebo roztoky kyselin. Volné kladné a záporné ionty budou vlivem působícího napětí putovat roztokem vždy k elektrodě s opačným nábojem. Na elektrodě připojené ke kladnému pólu zdroje dochází k oxidaci, v důsledku odtrhávání elektronů. U záporné elektrody se tedy vylučuje z roztoku vodík, u kladné elektrody se vylučuje kyslík. Při výrobě vodíku se nejčastěji používá roztok kyseliny sírové ve vodě. Lze ale použít i jiné elektrolyty [17].

Spotřeba energie v moderních elektrolyzérách se pohybuje okolo 47.8-53.4 kWh/kg, s účinností procesu okolo 65 %. Tato hodnota nicméně neuvažuje účinnost při získávání elektrické energie [16][20]. Celková účinnost výroby vodíku elektrolýzou se tedy pohybuje okolo 20-30 %, bereme-li v úvahu výrobu elektrické energie ze standardních zdrojů o účinnosti lehce nad 30 %.

Výhoda elektrolýzy je v možnosti použití elektrické energie, jež může pocházet z různých zdrojů. Při získávání energie z OZE by nadbytek energie mohl být využit právě k elektrolytickému rozkladu vody. Pokud nastanou podmínky příznivé pro OZE (bude foukat vítr a svítit slunce), snadno může nastat situace, že energii nebudeme schopni nikde použít, a tak namísto odpojování zdrojů může být takto uskladněna. Výhodná situace by mohla být například v oblasti pobřeží, kde budou ve velkém umístěny větrné elektrárny a zároveň dostatek vody.

- *Vysokoteplotní elektrolýza vody*

Při vysokoteplotní elektrolýze se vstupní energie skládá z energie elektrické a tepelné. Do elektrolyzéro vstoupí směs vodní páry a vodíku (cca 10 % vodíku). Přítomnost vodíku je nezbytná pro fungování elektrolýzy. Iont kyslíku prochází membránou, oxiduje na anodě a následně odchází ze systému. Na druhém výstupu vychází směs vodíku a vodní páry (cca 90 % vodíku). Voda se ze směsi odděluje v kondenzační komoře a část vodíku je navrácena zpět do systému.

Provozní teploty při tomto procesu se pohybují v rozmezí 600-1000 °C. Při těchto teplotách se snižuje množství elektrické energie potřebné pro rozklad molekul vody. Celková potřebná energie je vyšší než u klasické elektrolyzy, nicméně při použití odpadního tepla z jiných procesů se může celková účinnost zvýšit.

2.2.2 Skladování

Jedním z hlavních problémů použití vodíku je jeho skladování. V přirozených podmínkách se vodík vyskytuje jako plyn o velice nízké hustotě, má vysokou difuzivitu a je vysoce hořlavý. Musíme ho tedy uchovávat v bezpečných tlakových nádobách, případně v kryogenních nádobách v kapalné formě. Takové zásobníky vodíku je těžké vyrobit. Musí být odolné vůči velkým tlakům a v případě skladování v kapalné fázi musí mít také výborné izolační vlastnosti. Použitý materiál musí být odolný vůči poškození vodíkem (křehnutí materiálu), jehož molekuly se snaží prostoupit veškerou hmotou. Při dlouhodobém skladování dochází k nezanedbatelným ztrátám vlivem prostupu vodíku přes stěny tlakové nádoby.

Pro statické aplikace se obvykle používá ocelových bezešvých lahví, které jsou odolné vůči poškození vodíkem. Na skladování vodíku pro stacionární aplikace se běžně používají velkokapacitní tlakové zásobníky o pracovním tlaku 50 bar. Vyrábějí se o vnitřních objemech 25, 50, 95 m³ [18].

Proces stlačování vodíku pro skladování ve vysokotlakových nádržích je velice energeticky náročná záležitost. Pro stlačování se používají pístové kompresory. Energie potřebná na stlačení vodíku, na tlak 350 bar, dosahuje přibližně 30 % energie v něm uložené. Zkapalňování vodíku je technologicky i energeticky nejnáročnější proces. Energie potřebná ke zkapalnění dosahuje přibližně 40 % energie v něm uložené. Výhoda je, že jsme schopni na stejném objemu uložit více energie, než u skladování v plynné formě [19].

2.2.3 Energetické využití

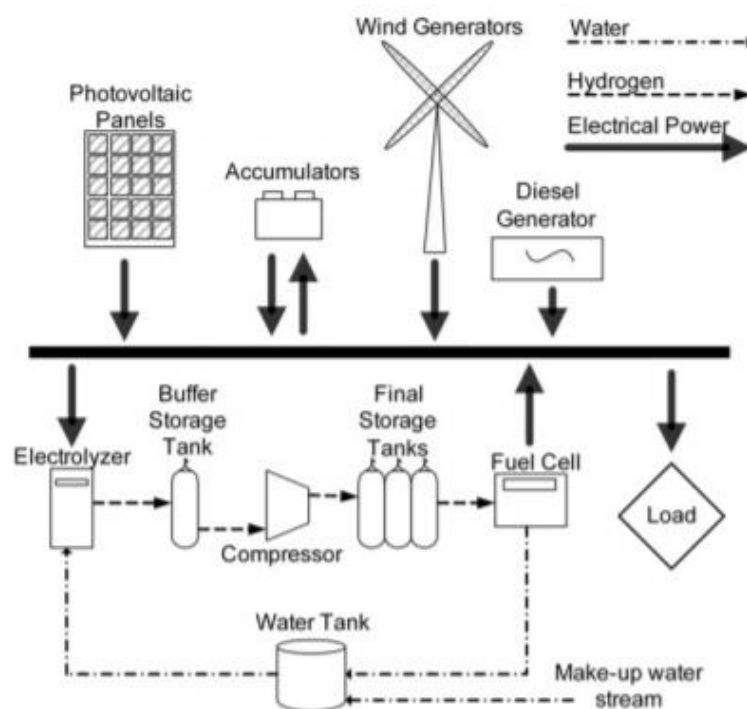
Pro zpětné získávání elektrické energie akumulované ve vodíku se používají palivové články, které generují elektrickou energii slučováním vodíku a kyslíku. Na trhu se vyskytuje mnoho druhů palivových článků, jenž se liší použitými materiály a provozními teplotami.

Oproti tepelným strojům s generátorem elektrické energie dosahují palivové články při výrobě elektrické energie vysokých účinností. V laboratorních podmínkách teoreticky až 60 %. Reálná

účinnost je však okolo 50 %, dle zatížení a typu palivového článku. Testovaný vodíkový systém UJV Řež použil pro své vodíkové hospodářství palivový článek Fronius Energy Cell 50F, u kterého byla zjištěna účinnost 49 % [20]. Tento systém akumuluje přebytečnou energii ze solárních panelů do vodíku. Vysoká účinnost je dána zejména přímou přeměnou energie, nikoliv přes mezistupně (tepelný a mechanický), jako je tomu např. u spalovacích motorů.

2.2.4 Obnovitelné zdroje energie

Jak již bylo předesláno vodíkové technologie mají potenciál v akumulaci elektrické energie získané z OZE. V místech produkce elektřiny z obnovitelných zdrojů energie by mohly být vybudovány systémy akumulace energie do vodíku, v budoucnu například na okraji měst či vesnic. Takto získaný vodík by poté bylo možné využít dle lokálních podmínek buď jako palivo pro dopravu nebo pro opětovnou výrobu elektřiny. Na Obr. 2.9 je nastíněno, jak by systém mohl vypadat.



Obr. 2.9 Vodíkové hospodářství pro akumulaci energie z OZE [21]

2.2.5 Bezpečnost

Vodík je velice reaktivní plyn, v praxi je nebezpečná hlavně jeho reakce s kyslíkem, který je obsažen ve vzduchu. V rozmezí koncentrace 4-75 % vodíku ve vzduchu směs hoří, v rozmezí koncentrace 18-59 % je směs explozivní [14]. K zažehnutí směsi vodíku

se vzduchem je potřeba velmi malá energie. V praxi to pro nás znamená zamezit smíšení skladovaného vodíku se vzduchem. Vodík je lidskými smysly nedetekovatelný. Pokud se uvolní do okolí, díky jeho nízké hustotě stoupá vzhůru. Vlivem schopnosti se rychle rozptýlit do prostoru, jeho koncentrace rychle klesá pod dolní hodnotu explozivnosti. V případě úniku v uzavřené místnosti se tento plyn hromadí u stropu. Je tedy vhodné takové místnosti patřičně odvětrávat a ke stropu rozmístit detektory vodíku.

Velmi nebezpečnou vlastností vodíku je záporný Joule-Thomsonův koeficient [15]. Záporné znaménko tohoto koeficientu znamená, že se vodík zahřívá při uvolnění tlaku. Existuje proto nebezpečí, že při náhlé expanzi stlačeného vodíku, může dojít k jeho samovznícení.

2.2.6 Výhody a nevýhody

Z předchozího textu se může zdát, že vodíkové hospodářství je ideální způsob pro akumulaci elektrické energie. Jeho výhody jsou ale kompenzovány řadou nevýhod.

Mezi hlavní výhody vodíkového hospodářství patří, že nijak negativně neovlivňuje životní prostředí. Vodík je netoxický a při jeho zpracování pomocí elektrolýzy vody nedochází k uvolňování emisí do okolí. Další výhodou je jeho dostupnost. Vodík lze získávat z vody, které je na Zemi na většině míst dostatek. Dále pak při použití palivových článků je možné dosáhnout vyšších účinností než v klasických generátorech. A hlavní výhodou je vysoká specifická hustota energie. Ta umožní uložení velkého objemu energie na malém prostoru.

Mezi nevýhody patří již zmiňovaný problém se skladováním. Dále cena/složitost získávání vodíku a jeho zpětná přeměna na elektrickou energii. Vysoká cena elektrolyzátorů a palivových článků, která má ale klesající tendenci. Pro samotnou elektrolýzu je potřeba velké množství vstupní elektrické energie, s tím je spojená i relativně nízká celková účinnost. Jeden z nejvýznamnějších problémů je bezpečnost, vzhledem k možnosti výbuchu vodíku.

Pro masovější využití vodíku musí být vodíkové hospodářství 100 % bezpečné a spolehlivé.

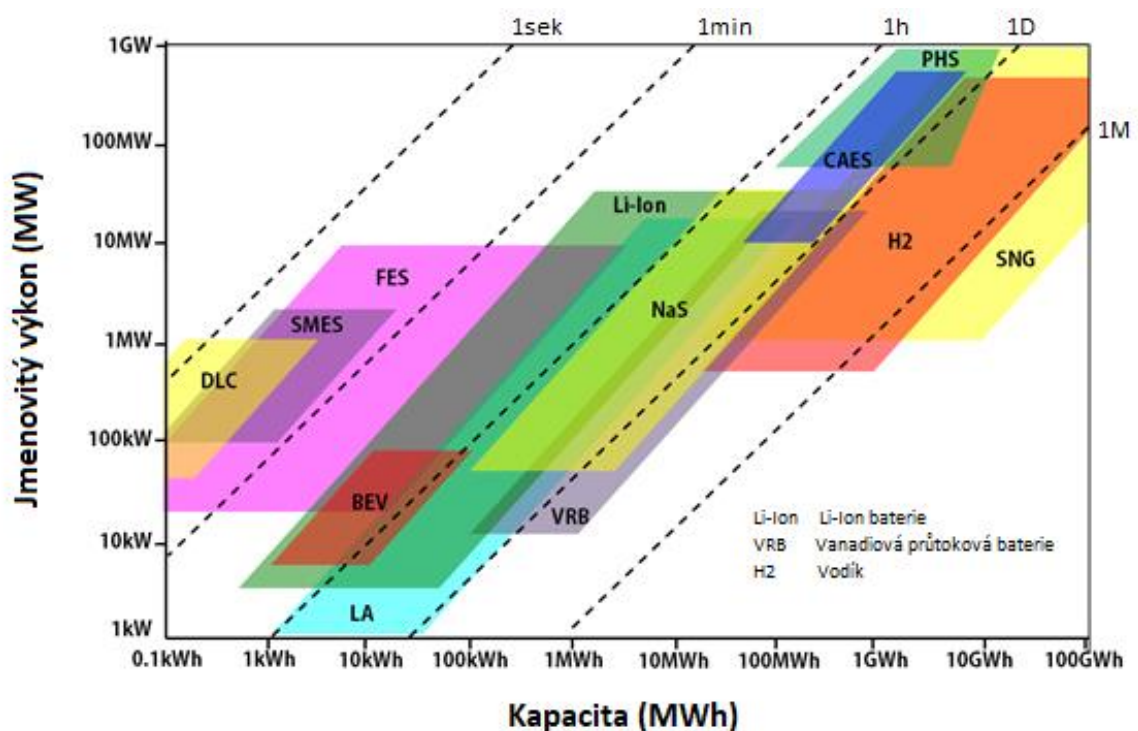
2.3 Vyhodnocení použití elektrochemických baterií a vodíku

Při porovnávání jednotlivých typů sekundárních baterií jsem sledoval jejich použití v praxi a jednotlivé parametry, jako je cena, měrný výkon, energetická hustota, životnost. Po porovnání všech parametrů jsem dospěl k názoru, že pro akumulaci energie z fotovoltaických panelů

pro rezidenční účely (tzn. akumulace elektrické energie v řádu jednotek až desítek kWh) je nejvhodnější technologie Li-ion, konkrétně LiFePO₄. Tyto akumulátory disponují dostatečnou hustotou energie, životností a lze pozorovat příznivý vývoj ceny.

Dále jsem zjistil, že pro akumulaci elektrické energie z velkých větrných a fotovoltaických parků patří mezi nejvhodnější technologie průtokové baterie VRB. Ty jsou schopny uchovávat energii v řádu stovek MWh. Do průtokových baterií začalo investovat mnoho firem a čekám v budoucnu velké navýšení v instalované kapacitě.

Vodík má potenciál pro ukládání energie v největších objemech (Obr. 2.10). Za předpokladu zvládnutí problémů s dlouhodobým skladováním vodíku, si lze představit sezónní ukládání energie (seasonal storage). To by mohlo fungovat tak, že každé větší město by mělo na svém okraji vlastní vodíkové hospodářství, kde by byl vyráběn a ukládán vodík. Přes léto by se ukládala energie ze solárních panelů do vodíku. Tato energie by byla získána zpět v zimě, kdy slunce svítí málo, ale poptávka po energii je vyšší.



Obr. 2.10 Porovnání jmenovitého výkonu a kapacity akumulčních technologií [36]

3. Modelový příklad FVE s akumulací

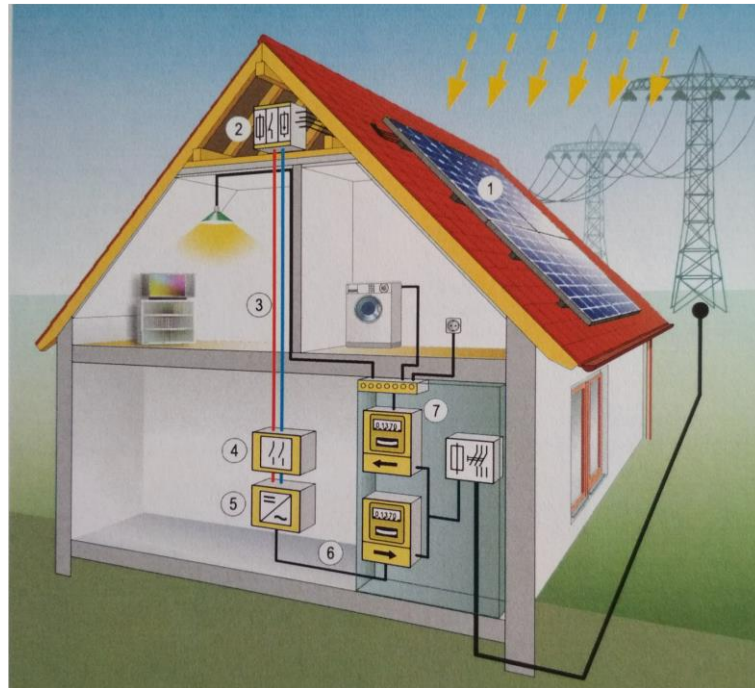
Ve svém modelovém příkladu budu uvažovat systém fotovoltaických panelů v kombinaci s akumulací energie. Nejprve nastíním nevýhody provozu FVE bez akumulace energie. Poté vytvořím dva modelové příklady s akumulací energie a navzájem je porovnáám. Vyberu komponenty, ze kterých je možno dané FV systémy sestavit a provedu ekonomické vyhodnocení.

3.1 FVE bez akumulace energie

V Evropské unii je provozována většina fotovoltaických elektráren bez systému akumulace energie. Tato situace je dána dotacemi, které umožnily výstavbu velkého množství fotovoltaických elektráren. Bez dotací by FVE okolo roku 2008 stavěl jen málo kdo. Výkupní ceny solární energie byly v roce 2009, kdy došlo k nejmasivnější výstavbě v ČR, 13.86 Kč/kWh. Lidé v té době brali solární elektrárny pouze jako formu investice se státem garantovaným výnosem.

Z FVE přímo připojených do sítě se staly zdroje, které negativně ovlivňují stabilitu sítě a kvalitu elektrické energie.

Na *Obr. 3.1* je zobrazen fotovoltaický systém bez akumulační technologie připojený k elektrické síti. Mezi hlavní komponenty patří: 1. FV generátor (FV moduly zapojené serio-paralelně, pro získání optimálních výstupních hodnot napětí a proudu pro střídač), 2. Rozvaděč FVE s ochrannou technikou, 3. stejnosměrná kabeláž, 4. Hlavní DC vypínač, 5. Střídač, 6. Střídavá kabeláž, 7. Elektroměrová skříň s rozvodem (elektroměr výroby, elektroměr spotřeby a domovní přípojka).



Obr. 3.1 FV systém připojený k elektrické síti s přímým napájením [1]

3.1.1 Negativní vlivy FVE bez akumulace energie

Novela energetického zákona provedená s účinností od 1. 1. 2016, umožňuje provozovat výrobu o instalovaném výkonu do 10 kW bez licence na výrobu elektřiny. Jinými slovy, připojení malých solárních zdrojů do 10 kW je velice jednoduchý proces, který je ovšem podmíněn tím, že výrobny si budou většinu vyráběné energie samy spotřebovávat. Toho nelze docílit bez akumulární technologie.

Problémy ovšem nastávají u větších výroben, které jsou určeny k dodávání energie přímo do ES. Zde je nutné, aby byly splněny připojovací podmínky dané platnými normami. S normami je spjata studie připojitelnosti. Studie připojitelnosti se obecně dělá až pro zdroje nad 30 kW, u kterých se již uvažuje možnost negativního ovlivňování sítě.

Možné negativní vlivy způsobené připojením FVE:

Flikr:

Flikr je definován jako subjektivní vizuální dojem při nestabilním světelném toku, jehož jas nebo spektrální rozložení se mění v čase. Vzniká jako následek kolísání napětí v síti, které může být způsobeno rychlými změnami ve výrobě energie z FVE. Blikání světelných zdrojů tím způsobené, má negativní účinky na člověka, což bylo hlavní příčinou zavedení povolených

úrovní flikru. Povolené úrovně flikru jsou uvedeny v normě ČSN EN 50160 – charakteristiky napětí veřejné distribuční sítě. Na kolísání napětí je také náchylná domácí elektronika, jako počítač a televize.

Zvýšení napětí:

Napětí je lokální parametr sítě. Vlivem výroby FVE dochází ke zvýšení napětí v místě jejich připojení. V pravidlech pro provozování distribučních soustav nalezneme procentní násobek jmenovité hodnoty napětí, o který může nově připojená výrobná zvýšit napětí v předávacím místě provozovatele distribuční soustavy. Na hladině NN nesmí dojít ke změně o více než 3 % jmenovitého napětí. Na hladině VN nesmí dojít ke změně o více než 2 % jmenovitého napětí [40]. Změna napětí pro posuzování připojitelnosti se provádí nezávisle v síti NN na síti VN a naopak. Celkově může dojít k navýšení jmenovitého napětí až o 5 % a vše bude ještě v pořádku.

Odchylky a nesymetrie napětí:

Norma udává dovolenou odchylku napětí od jmenovité hodnoty $\pm 10\%$ pro hladinu NN i VN. Jednofázové zdroje (především fotovoltaiky) ovlivňují symetrii fázových napětí v síti NN podobně, jako jednofázová zatížení. Nesymetrie napětí se vyhodnocuje v trojfázové síti. Dochází k různé velikosti efektivních hodnot sdružených napětí, nebo fázovému posuvu mezi sdruženými napětími.

$$u_2 = \frac{U_{(2)}}{U_{(1)}} \cdot 100 \leq 2\% \quad (3.1)$$

Rovnice (3.1) popisuje stupeň nesymetrie napětí. $U_{(2)}$ v čitateli značí zpětnou složku napájecího napětí a $U_{(1)}$ ve jmenovateli vzorce značí souslednou složku napětí. Jejich poměr by měl být udržován pod hranicí 2 %.

Změny frekvence:

Frekvence je globální (systémový) parametr sítě. Je v celé ES stejná. Veličina ovlivňující velikost frekvence je P (činný výkon). V propojených elektrizačních soustavách EU je nominální hodnota frekvence 50 Hz. Taková hodnota je udržována v případě, že aktuálně vyráběná energie se rovná aktuálně spotřebované.

S větší penetrací FVE bez akumulace energie lze rovnováhu mezi spotřebou a výrobou činného výkonu udržovat jen těžko. Tím dochází ke kolísání frekvence v síti.

Přetoky činných a jalových výkonů:

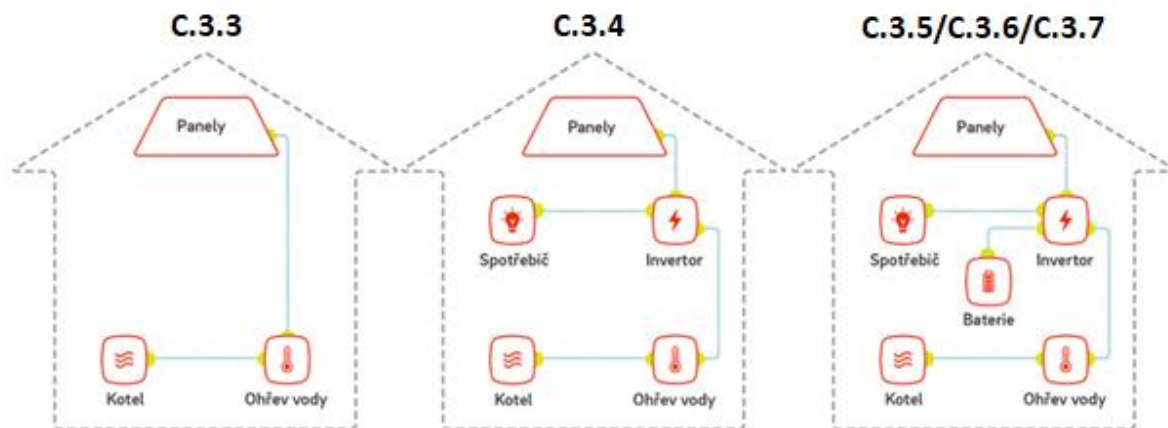
Jsou často způsobeny změnami ve výrobě a spotřebě energie. Přetoky se snažíme omezovat tak, abychom byli schopni udržovat kvalitativní parametry sítě (frekvenci a napětí) v předepsaných mezích. Podle kodexu přenosové soustavy chceme v předávacích místech zajistit, aby nedocházelo ke zpětným přetokům výkonu do nadřazené soustavy a zároveň účinník odebíraného činného i jalového výkonu nesmí být nižší než 0.95. Při nedodržení těchto podmínek dochází k přetokům výkonu do nadřazené soustavy, vedení je více namáháno a dochází k tepelným ztrátám.

3.2 FVE s akumulací energie

Od roku 2008/2009, kdy byl největší boom s výstavbou fotovoltaických elektráren a během 2 let bylo vybudováno bezmála 2 000 MW instalovaného výkonu, jsme se posunuli dále. Po roce 2010 došlo k velkému útlumu v budování nových FVE, díky snížení státní garance výkupních cen. Zatímco dříve se lidé na solární energii dívali pouze jako na možnou potenciální investici, dnes se dostáváme ke konceptu šetření vlastních nákladů na elektrickou energii a energetickou nezávislost domácností. Cena solárních panelů šla od jejich boomu v ČR na třetinu. Dnes se jsou již schopny za určitých podmínek samy zaplatit. Tato ekonomická návratnost spočívá v ušetření financí za vlastní spotřebu elektřiny v domácnosti.

Trend a podpora výstavby nových FVE směřuje cestou instalací solárních panelů na střechy rezidenčních objektů společně s akumulací energie. Tato konfigurace eliminuje, nebo výrazně omezuje problémy vznikající u FVE přímo připojených do ES.

Aby mohla být využita dotace Ministerstva životního prostředí z programu Nová zelená úsporám, musíme uvažovat jednu z kombinací solární elektrárny s akumulací energie viz *Obr. 3.2.*



Obr. 3.2 Možnosti instalace FVE s akumulací v rámci NZÚ

3.2.1 Nová zelená úsporám

Solární elektrárny vyrábí nejvíce energie okolo poledních hodin. V tuto dobu po ní ale není v rodinných domech tak vysoká poptávka. Pokud chceme elektrickou energii v místě výroby efektivně využít, musíme do systému zařadit systém akumulace energie. Toho si všímá i státní program Ministerstva životního prostředí pro podporu obnovitelných zdrojů energie Nová zelená úsporám. V současnosti finančně podporuje pouze projekty s akumulací energie, ať už do vody ve formě tepla, nebo do akumulátorů ve formě elektrické energie. Podpora pro fotovoltaické elektrárny je poskytována pouze pro systémy s instalovaným výkonem do 10 kWp (mikrozdroje).

Tab. 3.1 Podporované typy FV systémů [42]

Podoblast podpory	Typ systému	Výše podpory (Kč)
C.3.1	Solární termický systém na přípravu teplé vody	35 000
C.3.2	Solární termický systém na přípravu teplé vody a přitápění	50 000
C.3.3	FV systém pro přípravu teplé vody s přímým ohřevem	35 000
C.3.4	FV systém bez akumulace elektrické energie s tepelným využitím přebytků a celkovým využitelným ziskem $\geq 1\,700$ kWh.rok ⁻¹	55 000

C.3.5	FV systém s akumulací elektrické energie a celkovým využitelným ziskem $\geq 1\,700$ kWh.rok¹	70 000
C.3.6	FV systém s akumulací elektrické energie a celkovým využitelným ziskem $\geq 3\,000$ kWh.rok¹	100 000
C.3.7	FV systém s akumulací elektrické energie a celkovým využitelným ziskem $\geq 4\,000$ kWh.rok¹	150 000

V Tab. 3.1 a Tab. 3.2 jsou popsány podmínky programu NZÚ uvedeného do provozu v roce 2014. Je zde definována podpora decentralizované výroby elektrické energie za pomoci FVE a akumulace energie. Dotaci lze čerpat pouze za splnění všech podmínek. Mezi hlavní podmínky patří minimální míra využití vyrobené elektřiny pro krytí spotřeby v místě výroby. Minimálně 70 % elektřiny produkované solárními panely musí být spotřebováno samotným rezidenčním objektem, na kterém je FVE nainstalována. Zbýlých 30 % může téci zpět do sítě, ale negenerují majiteli žádné peníze. Od roku 2014 stát stanovil nulovou podporu solární energie výkupní cenou [41]. Je možné se domluvit s provozovatelem distribuční soustavy a podepsat individuální smlouvu o výkupu přebytečné elektrické energie. Jedná se ale o výkup okolo 20 haléřů za kWh, jinými slovy velice nevýhodný obchod. Dále systém musí být vybaven měničem s minimální účinností 94 % a technologií pro sledování bodu maximálního výkonu s minimální účinností přizpůsobení 98 %. U měničů určených k přeměně stejnosměrného napětí (z elektrických akumulátorů) na střídavé napětí používané ve vnitřních rozvodech – tzv. hybridní měniče, se připouští minimální účinnost 92 %. Použití nejmodernější technologie solárních panelů je podporováno tím, že její účinnost vztažená k celkové ploše panelu musí být alespoň 15 % (pro mono- a polykrystalické články).

Dle způsobu akumulace energie do ohřevu vody, nebo akumulátorů a množství využitelné energie produkované solárním systémem, rozeznáváme 4 různě velké dotace. Nejvyšší je pro FVE s akumulátorem a množstvím využitelné energie za rok min. 4 000 kWh. Samozřejmě náklady na výstavbu takové elektrárny jsou, vzhledem k její velikosti a potřebě instalace odpovídajícího akumulátoru, nejvyšší.

Největší množství nově instalovaných FVE na rezidenčních objektech je prováděno s dotací 55 000 Kč v rámci programu Nová zelená úsporám v podoblasti podpory C.3.4. Jedná se

o systém bez akumulátoru s tepelným využitím přebytků energie pro ohřev vody. Ovšem v létě, kdy solární elektrárna vyrábí nejvíce energie, paradoxně teplá voda není tolik potřeba. Tím se snižuje celková efektivita systému.

S poklesem ceny a vylepšováním technologií elektrochemických baterií nabývají systémy s akumulátorem postupně na významu.

Tab. 3.2 Požadavky na fotovoltaické systémy v podoblasti podpory C.3.4, C.3.5, C.3.6 a C.3.7 [42]

Sledovaný parametr	Označení (Jednotky)	C.3.4	C.3.5	C.3.6	C.3.7
Celkový využitelný zisk	$Q_{ss,u}$ (kWh.rok ⁻¹)	≥ 1 700	≥ 1 700	≥ 3 000	≥ 4 000
Minimální míra využití vyrobené elektriny pro krytí spotřeby v místě výroby	(%)	70	70	70	70
Akumulace přebytků energie do teplé vody	-	Povinná	Možná	Možná	Možná
Minimální měrný objem zásobníku teplé vody nebo akumulační nádrže	(l.kWp ⁻¹)	80	-	-	-
Akumulace přebytků energie do elektrických akumulátorů	-	Možná	Povinná	Povinná	Povinná
Minimální měrná kapacita akumulátorů	(kWh.kWp ⁻¹)	-	1.25	1.25	1.25

3.3 Modelový příklad

K vytvoření modelového příkladu jsem si vybral rodinný dům v obci Zahájí na Českobudějovicku. Jedná se o menší jednopodlažní objekt s rozměry 12 m na délku a 6 m na šířku. Sklon střechy je zde 45° s orientací téměř na jih (Obr. 3.3).

Nejvíce elektřiny vyrobí v České republice fotovoltaický panel orientovaný k jihu se sklonem okolo 35° . Přesný sklon ani orientace panelů však nejsou nijak kritické. Dokonce i při jejich vodorovném umístění je snížení celoročního výnosu elektřiny jen nepatrně nad 10 %. Při montáži na střechu domu je proto při současných cenách konstrukcí panelů výhodnější panely umístit paralelně se střešní krytinou (pokud nejsou přímo součástí krytiny), proto je úhel 45° absolutně dostačující. Takové řešení je obvykle nejen ekonomicky výhodnější, ale i lépe vypadá.



Obr. 3.3 Rodinný dům vybraný pro modelový příklad

Pro modelování jsem si vybral jeden z nejpropracovanějších softwarů na tuto problematiku, vyvíjený německou firmou Valentin Software – program PV*SOL premium. Program je nový a zatím není dostupný v českém jazyce, pro práci jsem si zvolil anglické uživatelské prostředí. V databázi PV*SOL lze najít statistická data o počasí v České republice podle jednotlivých

oblastí a statistická data slunečního osvitu. Pro mě je nejvíce vyhovující místo s takovými dlouhodobě uchovávanými daty jaderná elektrárna Temelín, které jsem si zvolil jako referenční. Jaderná elektrárna Temelín se nachází 11 km vzdušnou čarou od obce Zahájí. Při vytváření nového projektu jsem si spolu s požadovanou oblastí zvolil i typ systému pro model. Budu porovnávat dva FV systémy, oba připojené k síti. První s akumulací přebytků energie do ohřevu teplé užitkové vody a možností získání dotace v rámci programu NZÚ v podoblasti podpory C.3.4. Druhý s akumulací elektrické energie do LiFePO₄ akumulátorů a možností získání dotace v podoblasti podpory C.3.6.

Po zvolení oblasti a typu systému jsem se dostal k dalšímu bodu, a to nadefinování spotřeby elektrické energie rodinného domu. Počítám s rodinou dva dospělí a dvě děti. Umístěním jednotlivých spotřebičů do domácnosti jsem se dostal na spotřebu 4 308 kWh/rok. Do této spotřeby není zahrnuta energie potřebná na ohřev teplé užitkové vody, kterou jsem určil pomocí online kalkulačky [43] na 4 000 kWh/rok. Část z této energie bude kryta fotovoltaickou elektrárnou.

Další část již obsahuje tvorbu 3D modelu s umístěním solárních panelů na střechu. Z volně dostupných map na internetu jsem po jejich porovnání vybral mapy Google, které poskytovaly nejlepší rozlišení. Vyexportoval jsem požadovanou oblast s rodinným domem do programu PV*SOL premium. Poté bylo třeba zkalibrovat vzdálenosti v mapách (měřítko), aby odpovídaly reálným vzdálenostem. Z *Obr. 3.4* je krásně vidět skoro ideálně na jih situovaná střecha objektu.

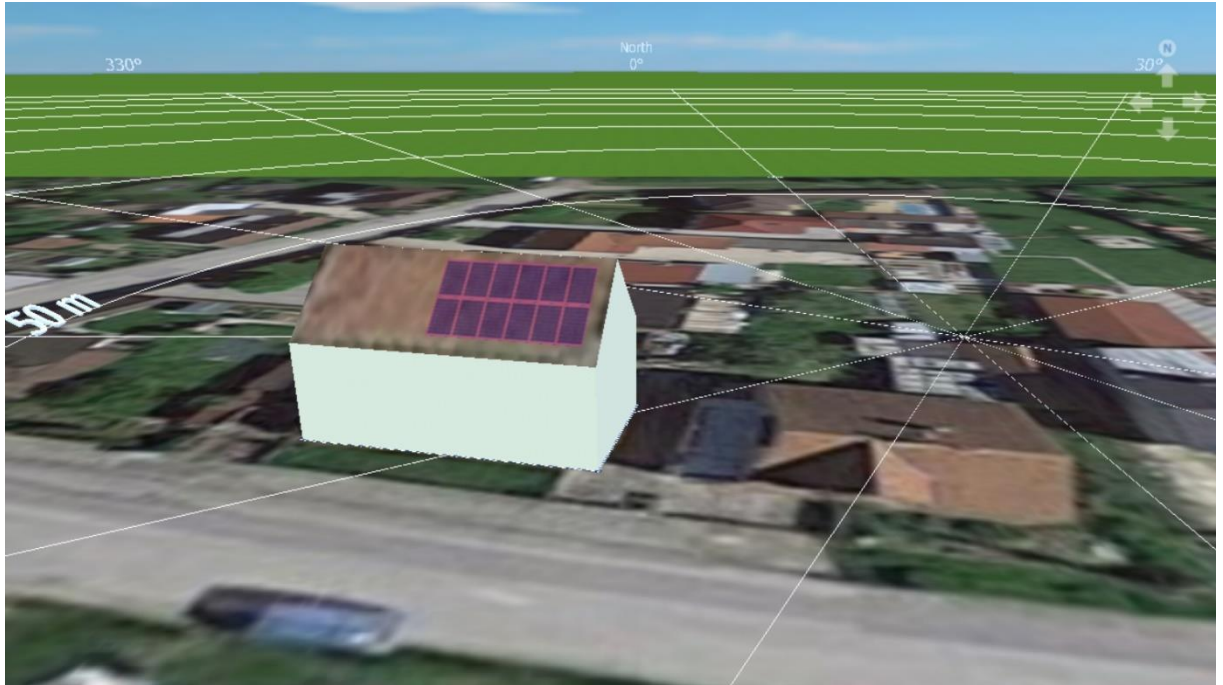


Obr. 3.4 Mapa s rodinným domem vyexportovaná do programu PV*SOL

Přiblížením satelitního snímku jsem byl schopen přesně zaměřit rodinný dům. Pomocí funkcí v programu jsem zakótoval rozměry střechy, nadefinoval její typ a sklon. Dále jsem zadal ostatní rozměry domu. Při dokončení tohoto kroku již byl vykreslen 3D model cílového objektu (Obr. 3.5), zatímco zbytek mapy s ostatními domy zůstal ve formě 2D satelitního snímku.

Pokračoval jsem výběrem optimálního počtu, umístění a typu solárních panelů. Pro tyto panely jsem musel vybrat střídač s MPP (Maximum power point) trackerem, tak aby byl výkon z FVE vyveden s co nejmenšími ztrátami. Vybral jsem 12 panelů Canadian Solar Inc. CS6K-280P, ke kterým postačil jeden střídač Kostal PIKO 3.0 MP s max. výstupním výkonem 3 kW. Poté jsem propojil samotné panely vodiči, což mi poskytlo hrubý odhad potřebného množství DC a AC kabelu pro instalaci FVE. Poslední bod 3D modelu spočíval v simulaci stínění slunečního osvětlení. Do modelu lze umístit další 3D objekty, které v určitých hodinách vrhají stín na střechu

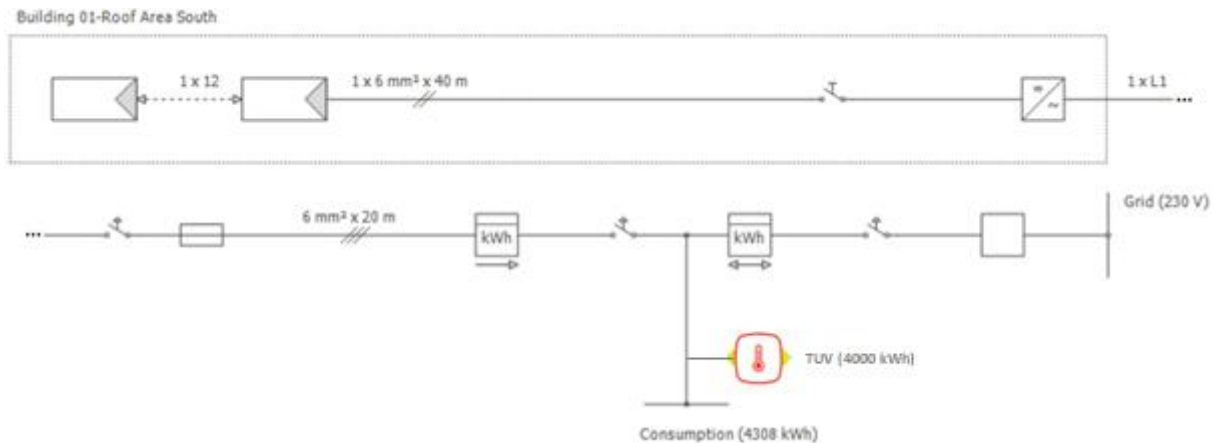
domu a snižují tak výtežnost systému. V mém případě je dům umístěn ideálně, k žádnému zastínění nedochází, proto jsem tento krok mohl vynechat.



Obr. 3.5 3D model rodinného domu

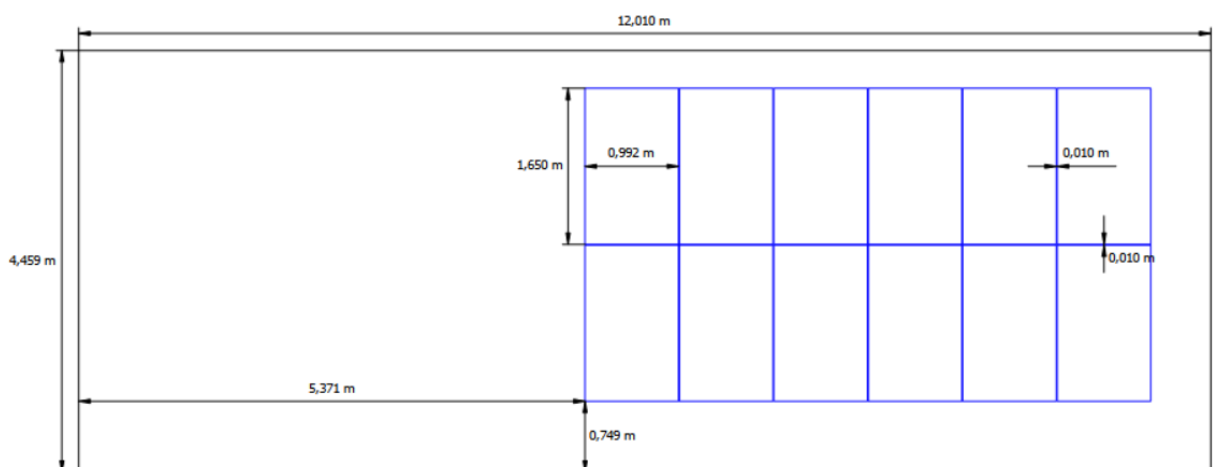
V dalším bodě jsem se dostal přímo ke zvolení průřezu a materiálu vodičů potřebných pro instalaci FVE. Zvolil jsem měděné vodiče o průřezu 6 mm^2 . Potřeba DC kabelů vyšla na 40 m a strana AC za střídačem na 20 m (Obr. 3.6). Ze zadaných parametrů jsem v programu spočítal průměrné roční ztráty energie, způsobené průchodem proudu kabely.

Fotovoltaická elektrárna z hlediska základních komponentů byla nakonfigurována a schématický obvod můžeme vidět na Obr. 3.6. Jedná se tedy o systém dimenzovaný na léto tak, aby nebyl zbytečně předimenzován a co nejméně energie vracel zpět do sítě. Domácnost z vlastní vyrobené elektrické energie musí spotřebovávat nejméně 70 %, jinak by přestala splňovat podmínky dotačního programu NZÚ.



Obr. 3.6 Schématický obvod FVE s akumulací přebytků energie do vody

Pro ilustraci uvádím i rozložení fotovoltaických panelů se zakótováním střechy domu (Obr. 3.7). Umístění panelů s rezervou od okrajů střechy je prováděno záměrně, aby byla instalace a manipulace s panely co nejjednodušší.



Obr. 3.7 Rozložení fotovoltaických panelů na střeše

3.3.1 Komponenty solární elektrárny

Solární panely:

Pro můj FV systém jsem zvolil 12 panelů CanadianSolar Poly 280 Wp. Celá elektrárna má tedy instalovaný výkon 3.36 kWp. Tyto panely se dají pořídit za cenu 4 393 Kč/kus [44] a odpovídají podmínkám pro získání dotace z programu NZÚ. Základní specifikace je uvedena na Obr. 3.8.

Specifikace	
Hmotnost (kg)	18,2
Konektor	MC4
Jmenovitý výkon (Wp)	280
Napětí v bodě max. výkonu (V)	31,3
Proud v bodě max. výkonu (A)	8,95
Napětí na prázdko (V)	38,2
Zkratový proud (A)	9,52
Účinnost solárního panelu (%)	17,11
Max. zatížení tlakem (Pa)	6000
Výška (mm)	1650
Šířka (mm)	992
Hloubka (mm)	40
Jmenovité napětí (V)	32
Šířka buňky (mm)	156
Výška buňky (mm)	156
Počet buněk	60



Obr. 3.8 CanadianSolar CS6K-280P

Panely jsem vybral pro jejich dostupnost, vysokou účinnost a nízkou cenu.

Střídač:

Další finančně náročný prvek FVE je střídač. Vzhledem k výkonu elektrárny jsem zvolil střídač Kostal Piko 3.0, který lze pořídit za cenu okolo 25 000 Kč [45]. Jedná se o jednofázový střídač, který je vybaven MPP trackerem a disponuje účinností až 94.8 %.

Pro systém s akumulátorem použiji hybridní střídač Imeon 3.6, který je schopen při výpadku sítě automaticky přejít do ostrovního režimu.



Obr. 3.9 1f střídač Costal Piko 3.0 [45]

Akumulátor:

Vůbec finančně nejnáročnější prvek FVE je akumulátor s potřebným příslušenstvím, a to i přes to, že jejich ceny každoročně významně klesají. Akumulátor budu uvažovat pro FV systém podporovaný dotací z programu NZÚ v podoblasti podpory C.3.6. Jeden bateriový pack Pylontech US2000 Plus má kapacitu 2.4 kWh a již obsahuje BMS (battery management system), který hlídá přebíjení, maximální hloubku vybití a teplotu jednotlivých článků. Cena se pohybuje okolo 33 000 Kč/pack [47], je v ní zahrnut nosič na 4 bateriové packy, propojovací kabely a rámeček.

Pro mou FVE použiji 2 bateriové packy, tzn. celková kapacita bude 4.8 kWh. U tohoto LiFePO₄ akumulátoru výrobce garantuje počet cyklů vyšší než 6000 – při hloubce vybití 80 %, nebo dobu životnosti alespoň 10 let.



Obr. 3.10 Akumulátor Pylontech US2000 Plus – 2.4 kWh [46]

Wattrouter:

Toto zařízení slouží k maximalizaci spotřeby elektrické energie v místě její výroby. Na wattrouter se obvykle připojují boilers. Při přebytku vyráběné energie z FV elektrárny, zamezí přetokům energie do sítě a přebytečnou energii směřuje do ohřevu TUV. Cena se pohybuje okolo 5000 Kč.

Další komponenty:

Mezi další komponent FVE patří hliníková konstrukce pro uchycení na střechu. Po konzultaci s firmami instalující solární elektrárny, jsem dospěl k ceně konstrukce 18 000 Kč pro můj instalovaný výkon 3.36 kWp.

Dále se v celkové ceně promítanou náklady na svorky a propojení jednotlivých komponent (DC, AC kabeláž, MC4 konektory), dobrovolné zakoupení prodloužených záruk, výstroj rozvaděče, montáž, doprava, manipulace, režie.

3.3.2 Celkové náklady

Součtem všech položek i s prací se dostávám na cenu 143 000 Kč pro systém bez akumulátoru. Za tuto cenu lze dnes pořídit solární elektrárnu na klíč, koncová cena pro zákazníka bude ještě nižší o dotaci z programu NZÚ (55 000 Kč).

Pro systém s akumulátorem se dostávám na cenu 258 000 Kč. Z programu NZÚ je zákazník schopen získat dotaci 100 000 Kč.

Tyto ceny budu uvažovat dále při vyhodnocení použití FVE s akumulací energie a výpočtu doby návratnosti investice.

4. Vyhodnocení použití akumulční technologie a vývoj energetického trhu ČR do budoucna

V této kapitole budu prezentovat výsledky obou modelových příkladů. Rodinný dům je připojen přes 3f jistič 3x32 A se stálou platbou 173 Kč/měsíc. Sazba za distribuci je D25d, s cenou nízkého tarifu (NT) 1.9 Kč/kWh a cenou vysokého tarifu (VT) 5 Kč/kWh. Ceny za elektřinu jsem zadal do programu PV*SOL premium a nadefinoval časy vysokého a nízkého tarifu.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Jan	1	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	1	1	1	1	1
Feb	1	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	1	1	1	1	1
Mar	1	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	1	1	1	1	1
Apr	1	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	1	1	1	1	1
May	1	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	1	1	1	1	1
Jun	1	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	1	1	1	1	1
Jul	1	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	1	1	1	1	1
Aug	1	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	1	1	1	1	1
Sep	1	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	1	1	1	1	1
Oct	1	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	1	1	1	1	1
Nov	1	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	1	1	1	1	1
Dec	1	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	1	1	1	1	1

Obr. 4.1 Časové pásmo nízkého (2) a vysokého (1) tarifu za elektřinu

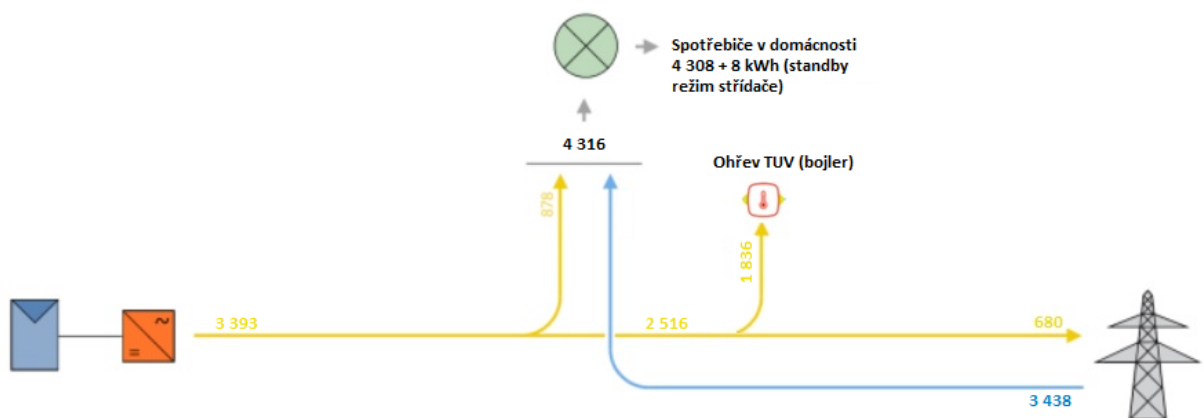
Obr. 4.1 popisuje časové pásmo nízkého a vysokého tarifu. Nízký tarif je označen číslicí 2 (žlutě). Vysoký tarif je označen číslicí 1. Platnost nízkého tarifu je celkově 8 hodin za den. Pět hodin je pro spotřebitele k dispozici v ranních hodinách a zbylé tři hodiny jsou k dispozici odpoledne.

Pro optimalizování plateb za elektřinu v domácnosti existuje kalkulačka [48] spravovaná Energetickým regulačním úřadem (ERÚ), kam lze zadat aktuálního dodavatele, produkt a roční spotřebu elektrické energie. Kalkulačka sama porovná Váš produkt s ostatními a spočítá roční úspory při změně produktu/dodavatele.

4.1 Vyhodnocení modelového příkladu v rámci dotačního programu NZÚ v podoblasti podpory C.3.4 – FVE s tepelnou akumulací přebytků energie do vody

Obr. 4.2 znázorňuje tok energie v rodinném domě během jednoho roku. Vidíme, že solární panely po odečtení ztrát na střídači poskytují 3 393 kWh elektrické energie. Z toho 878 kWh se využije přímo pro spotřebiče v domácnosti, 1 836 kWh pro ohřev TUV a 680 kWh je dodáno do sítě.

Aby byla pokryta energie potřebná pro všechny spotřebiče, je třeba ještě odebrat 3 438 kWh z distribuční sítě.



Obr. 4.2 Diagram ročního toku energie (všechny hodnoty v kWh)

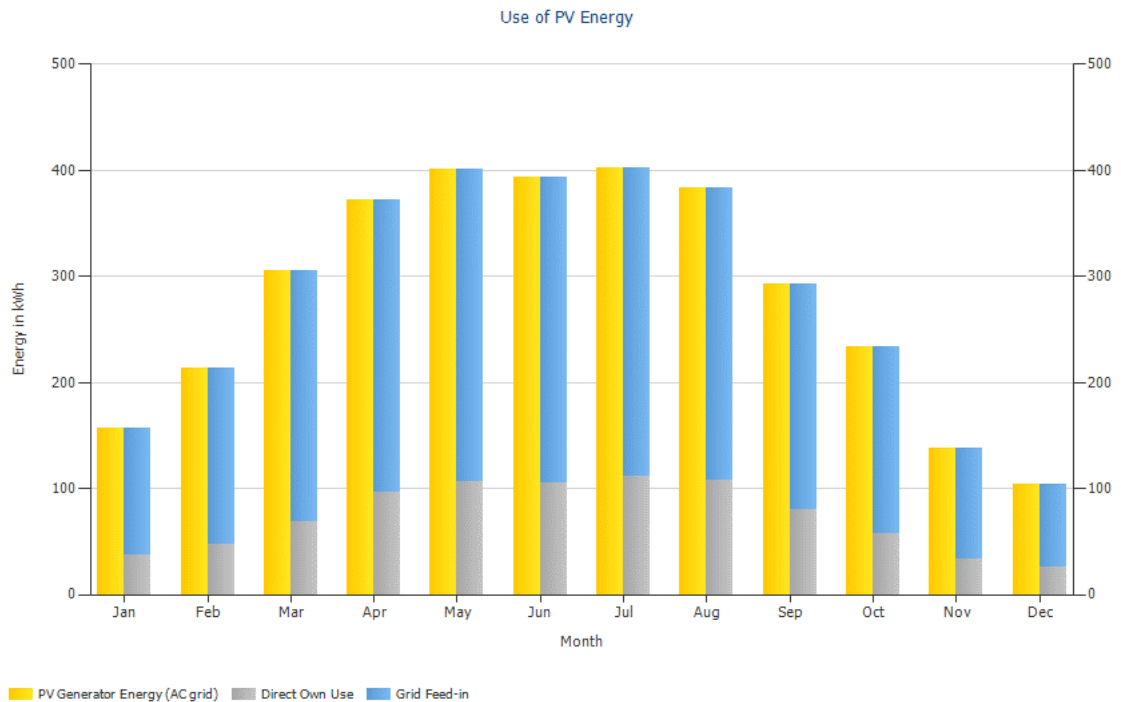
Dnes již distributoři elektrické energie připravují tarify přímo pro domácnosti s FVE. Na elektroměru bude načteno množství solární energie, kterou domácnost dodala do sítě a část této energie si pak bude moci ze sítě zdarma odebrat zpět.

Obr. 4.3 popisuje využitelnost solární energie pro spotřebiče v domácnosti. Žlutý sloupec vyjadřuje výrobu FV panelů v jednotlivých měsících, šedý sloupec množství energie přímo využitě domácími spotřebiči a modrý sloupec přebytečnou energii, která je použita na ohřev teplé užitkové vody a z menší části dodávána zpět do sítě. Využitelnost solární energie pro domácí spotřebiče se v tomto případě pohybuje okolo 25 %/rok.

Pokud by nebyla použita žádná forma akumulace energie, FV systém pro vlastní spotřebu by byl velmi neefektivní a dodával by do distribuční sítě více než 70 % vyrobené energie.

Naopak mnou navržený systém, s akumulací přebytků energie do ohřevu TUV, se dostane s využitelností solární energie na 80 %.

Ačkoliv lze očekávat, že v červnu bude svítit slunce s větší intenzitou než v květnu, v květnu FVE vyrobí celkově více energie. Je to dáno teplotou panelů, která je vlivem počasí v červnu vyšší. Vysoká teplota se negativně projeví na účinnosti solární elektrárny.



Obr. 4.3 Využití solární energie pro domácí spotřebiče

U Obr. 4.4 se dostávám k finanční analýze a době návratnosti FV systému. První řádek označen Investments, zahrnuje celkové náklady na výstavbu FVE na klíč (143 000 Kč). Další řádek, s popiskem Incoming Subsidies, označuje výši podpory získané z programu NZÚ (55 000 Kč), jedná se o jednorázovou dotaci započítanou v kalkulaci pouze pro první rok. Feed-in / Export Tarif – pod tímto označením je schovaná roční úspora energie za ohřev teplé užitkové vody. Electricity Savings udává přímo roční úsporu za elektrickou energii pro domácí spotřebiče, díky snížení množství odebrané elektrické energie ze sítě. Řádek Annual Cash Flow udává součet všech ročních úspor za elektrickou energii a pod označením Accrued Cash Flow (Cash Balance) se skrývá celkový finanční stav investice. Čím dříve se v řádku Accrued Cash Flow dostaneme do kladných čísel, tím je lépe navržený projekt. V mém případě jsem se do kladných čísel dostal 12tý rok, mohu tedy říci, že takto navržená solární elektrárna se splatí za 12 let jejího provozu.

Model počítá se zdražováním ceny energie o 2 % ročně.

	year 1	year 2	year 3	year 4	year 5
Investments	-143 000,00 Kč	0,00 Kč	0,00 Kč	0,00 Kč	0,00 Kč
Incoming Subsidies	55 000,00 Kč	0,00 Kč	0,00 Kč	0,00 Kč	0,00 Kč
Feed-in / Export Tariff	3 122,20 Kč	3 351,57 Kč	3 322,04 Kč	3 293,23 Kč	3 265,12 Kč
Electricity Savings	3 877,19 Kč	3 919,36 Kč	3 962,55 Kč	4 006,78 Kč	4 052,06 Kč
Annual Cash Flow	-81 000,62 Kč	7 270,93 Kč	7 284,58 Kč	7 300,00 Kč	7 317,18 Kč
Accrued Cash Flow (Cash Balance)	-81 000,62 Kč	-73 729,69 Kč	-66 445,10 Kč	-59 145,10 Kč	-51 827,92 Kč

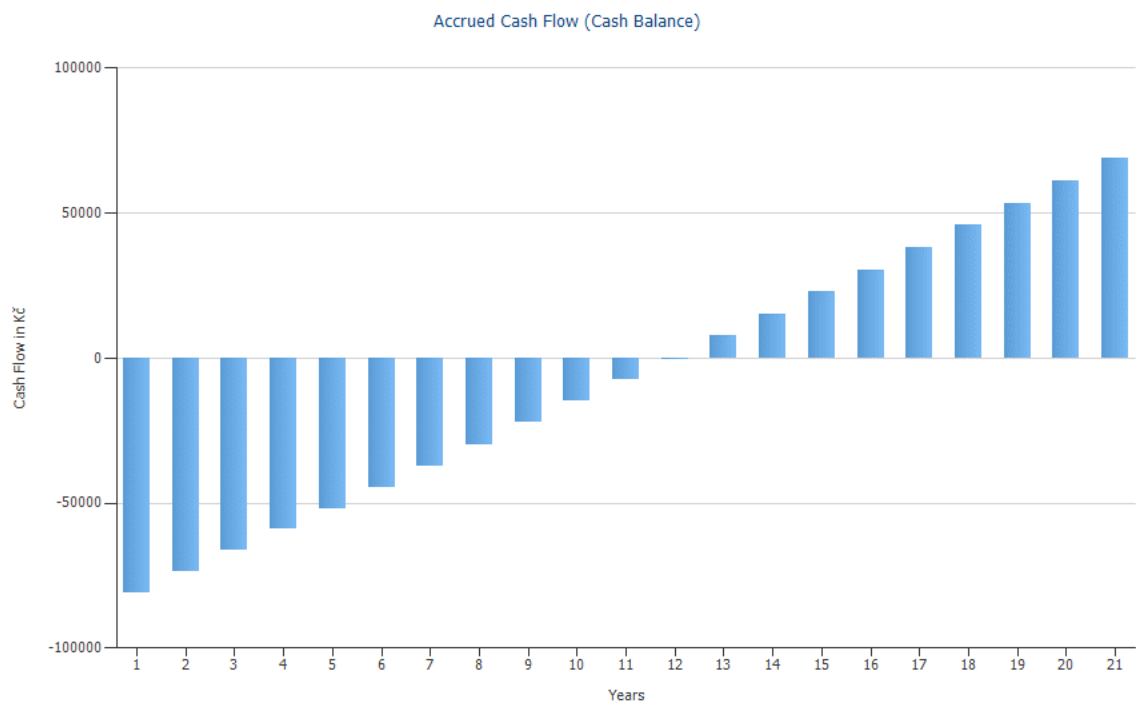
	year 6	year 7	year 8	year 9	year 10
Investments	0,00 Kč	0,00 Kč	0,00 Kč	0,00 Kč	0,00 Kč
Incoming Subsidies	0,00 Kč	0,00 Kč	0,00 Kč	0,00 Kč	0,00 Kč
Feed-in / Export Tariff	3 237,70 Kč	3 210,95 Kč	3 184,85 Kč	3 159,39 Kč	3 134,56 Kč
Electricity Savings	4 098,42 Kč	4 145,88 Kč	4 194,46 Kč	4 244,18 Kč	4 295,07 Kč
Annual Cash Flow	7 336,12 Kč	7 356,83 Kč	7 379,31 Kč	7 403,57 Kč	7 429,62 Kč
Accrued Cash Flow (Cash Balance)	-44 491,80 Kč	-37 134,97 Kč	-29 755,66 Kč	-22 352,09 Kč	-14 922,47 Kč

	year 11	year 12	year 13	year 14	year 15
Investments	0,00 Kč	0,00 Kč	0,00 Kč	0,00 Kč	0,00 Kč
Incoming Subsidies	0,00 Kč	0,00 Kč	0,00 Kč	0,00 Kč	0,00 Kč
Feed-in / Export Tariff	3 110,33 Kč	3 086,69 Kč	3 063,63 Kč	3 041,13 Kč	3 019,19 Kč
Electricity Savings	4 347,13 Kč	4 400,41 Kč	4 454,92 Kč	4 510,68 Kč	4 567,72 Kč
Annual Cash Flow	7 457,46 Kč	7 487,10 Kč	7 518,54 Kč	7 551,81 Kč	7 586,91 Kč
Accrued Cash Flow (Cash Balance)	-7 465,01 Kč	22,08 Kč	7 540,63 Kč	15 092,44 Kč	22 679,34 Kč

	year 16	year 17	year 18	year 19	year 20
Investments	0,00 Kč	0,00 Kč	0,00 Kč	0,00 Kč	0,00 Kč
Incoming Subsidies	0,00 Kč	0,00 Kč	0,00 Kč	0,00 Kč	0,00 Kč
Feed-in / Export Tariff	2 997,78 Kč	2 976,89 Kč	2 956,51 Kč	2 936,63 Kč	2 917,24 Kč
Electricity Savings	4 626,06 Kč	4 685,74 Kč	4 746,77 Kč	4 809,18 Kč	4 873,00 Kč
Annual Cash Flow	7 623,84 Kč	7 662,63 Kč	7 703,28 Kč	7 745,82 Kč	7 790,24 Kč
Accrued Cash Flow (Cash Balance)	30 303,18 Kč	37 965,81 Kč	45 669,09 Kč	53 414,91 Kč	61 205,15 Kč

Obr. 4.4 Propočet doby návratnosti FV systému

Pro lepší ilustraci doby návratnosti investice přikládám Obr. 4.5. Od dvanáctého roku již FVE uspořila více financí, než do ní bylo vloženo.



Obr. 4.5 Graf doby návratnosti investice

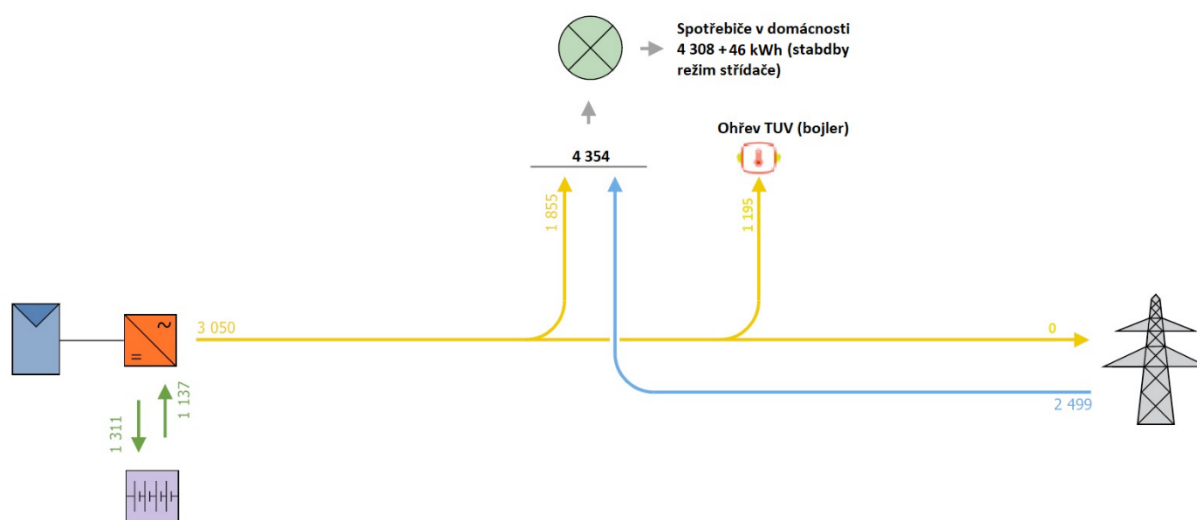
4.2 Vyhodnocení modelového příkladu v rámci dotačního programu NZÚ v podoblasti podpory C.3.6 – FVE s akumulátorem

Diagram ročního toku energie (Obr. 4.6) vypadá v případě FVE s akumulátorem ještě zajímavěji. Systém jsem navrhnul tak, že nedochází k žádným přetokům zpět do sítě a veškerá elektrická energie vyrobená solárními panely, je spotřebována v místě výroby.

Celkově dojde k úspoře 3 050 kWh, jenž slouží z větší části (1 855 kWh) k pokrytí energie pro domácí spotřebiče a z menší části (1 195 kWh) pro ohřev teplé užitkové vody.

FVE s akumulátorem zajistí ročně pro domácí spotřebiče o 977 kWh více elektrické energie než bez něj. Většina z této energie je v sazbě vysokého tarifu. Kromě této úspory patří mezi hlavní výhody tohoto systému schopnost fungování v ostrovním režimu. Při správné konfiguraci domácnosti její obyvatelé ani nepoznají, že došlo k výpadku sítě. Doba chodu domácnosti v ostrovním režimu je úměrná velikosti kapacity instalovaného bateriového systému.

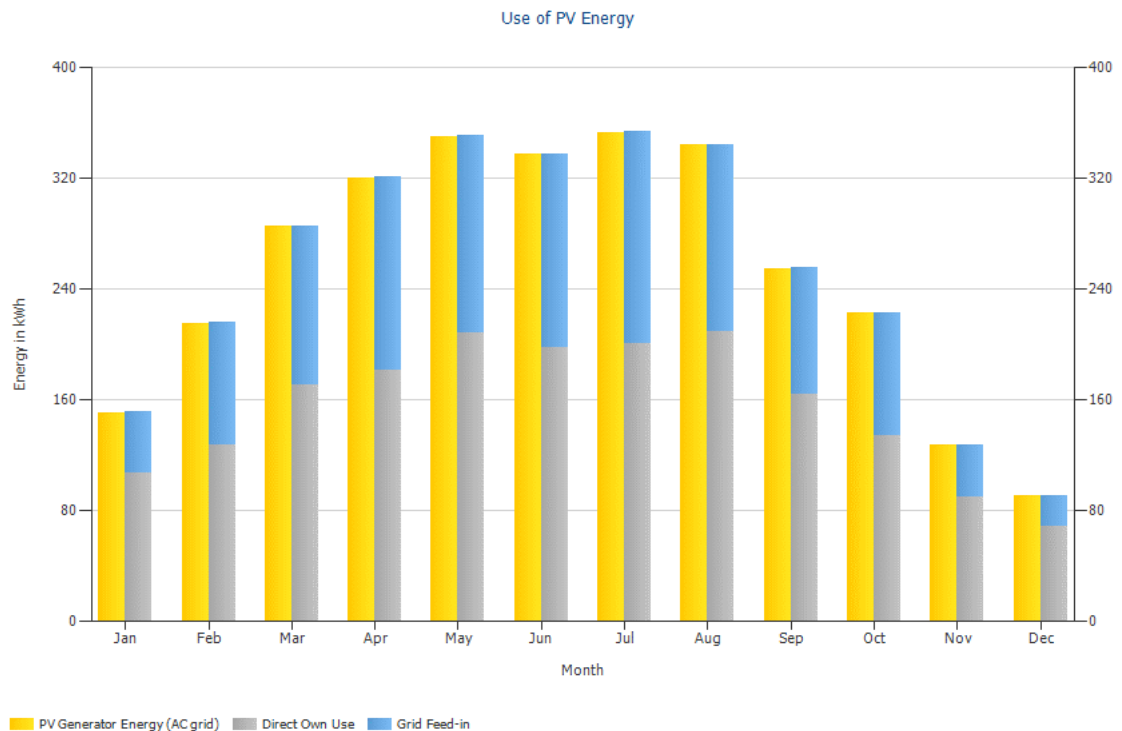
Aby byla pokryta elektrická energie potřebná pro všechny spotřebiče, je třeba ještě odebrat 2 499 kWh z distribuční sítě.



Obr. 4.6 Diagram ročního toku energie (všechny hodnoty v kWh)

Porovnáme-li množství energie dostupné za střídačem u obou systémů, zjistíme, že u FV systému bez akumulátoru máme k dispozici o 343 kWh ročně více. To je dáno hlavně ztrátami spojenými s nabíjením a vybíjením akumulátoru. Standby režim hybridního střídače spotřebuje také více energie.

Obr. 4.7 popisuje využitelnost solární energie pro spotřebiče v domácnosti. Žlutý sloupec vyjadřuje výrobu FV panelů v jednotlivých měsících, šedý sloupec množství energie přímo využitá domácími spotřebiči a modrý sloupec přebytečnou energii, která je použita na ohřev teplé užitkové vody. Zde je vidět asi největší rozdíl mezi oběma systémy. Zatímco v předchozím případě FVE kryla pouze 25 % elektrické energie potřebné pro domácí spotřebiče, použitím akumulátoru s kapacitou 4.8 kWh se dostaneme na krytí v průměru 61 %.



Obr. 4.7 Využití solární energie pro domácí spotřebiče

U Obr. 4.8 se dostávám znovu k finanční analýze a době návratnosti FV systému. První řádek označen Investments, zahrnuje celkové náklady na výstavbu FVE na klíč (258 000 Kč). Další řádek, s popiskem Incoming Subsidies, označuje výši podpory získané z programu NZÚ (100 000 Kč). Feed-in / Export Tarif – pod tímto označením je schovaná roční úspora energie za ohřev teplé užitkové vody. Electricity Savings udává přímo roční úsporu za elektrickou energii pro domácí spotřebiče, díky snížení množství odebrané elektrické energie ze sítě. Řádek Annual Cash Flow udává součet všech ročních úspor za elektrickou energii a pod označením Accrued Cash Flow (Cash Balance) se skrývá celkový finanční stav investice.

V tomto případě se do kladných čísel dostaneme začátkem 18. roku. Mohu tedy říci, že takto navržená solární elektrárna s akumulátorem se splatí zhruba za 17 let jejího provozu. Otázkou

je, jestli tak dlouho vydrží akumulátor. Výrobce garantuje záruku 10 let, nebo 6 000 cyklů na pokles kapacity akumulátoru na 80 % jmenovité kapacity. Po této době/cyklech by měl být akumulátor stále funkční, ale se sníženou kapacitou.

	year 1	year 2	year 3	year 4	year 5
Investments	-258 000,00 Kč	0,00 Kč	0,00 Kč	0,00 Kč	0,00 Kč
Incoming Subsidies	100 000,00 Kč	0,00 Kč	0,00 Kč	0,00 Kč	0,00 Kč
Feed-in / Export Tariff	1 477,86 Kč	1 595,31 Kč	1 581,25 Kč	1 567,53 Kč	1 554,15 Kč
Electricity Savings	6 939,65 Kč	7 015,13 Kč	7 092,44 Kč	7 171,59 Kč	7 252,64 Kč
Annual Cash Flow	-149 582,49 Kč	8 610,44 Kč	8 673,69 Kč	8 739,13 Kč	8 806,79 Kč
Accrued Cash Flow (Cash Balance)	-149 582,49 Kč	-140 972,04 Kč	-132 298,36 Kč	-123 559,23 Kč	-114 752,44 Kč

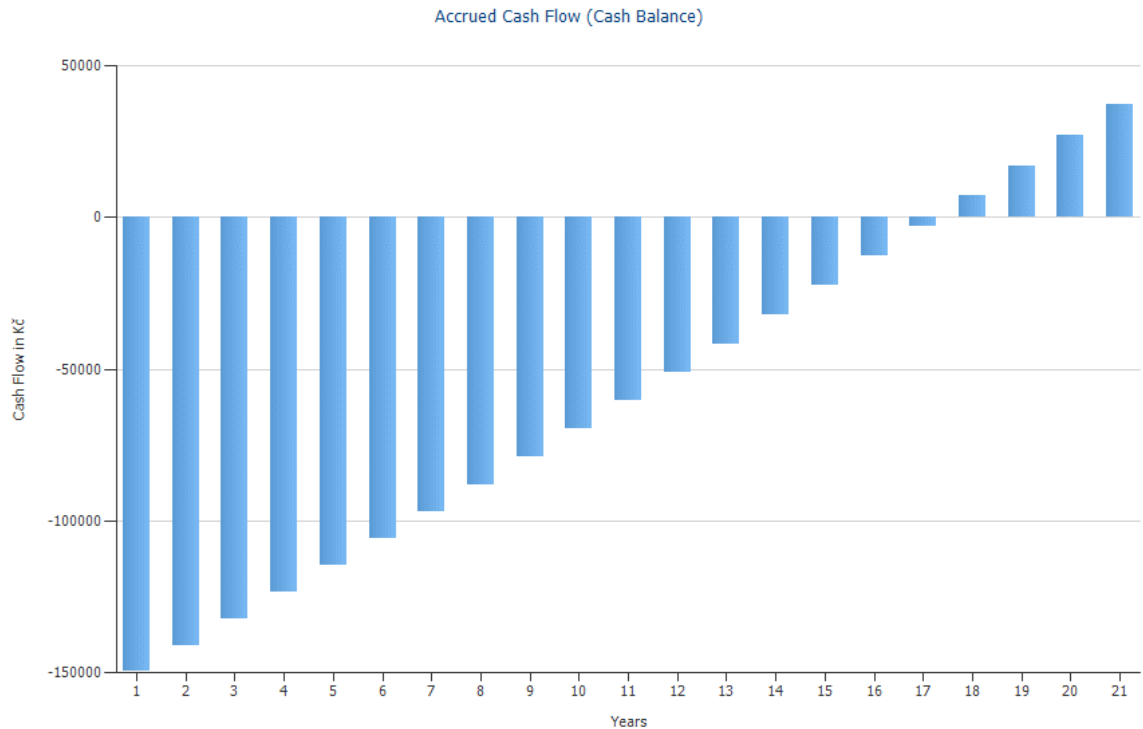
	year 6	year 7	year 8	year 9	year 10
Investments	0,00 Kč	0,00 Kč	0,00 Kč	0,00 Kč	0,00 Kč
Incoming Subsidies	0,00 Kč	0,00 Kč	0,00 Kč	0,00 Kč	0,00 Kč
Feed-in / Export Tariff	1 541,10 Kč	1 528,36 Kč	1 515,94 Kč	1 503,82 Kč	1 492,00 Kč
Electricity Savings	7 335,62 Kč	7 420,56 Kč	7 507,51 Kč	7 596,50 Kč	7 687,57 Kč
Annual Cash Flow	8 876,72 Kč	8 948,92 Kč	9 023,45 Kč	9 100,32 Kč	9 179,57 Kč
Accrued Cash Flow (Cash Balance)	-105 875,72 Kč	-96 926,79 Kč	-87 903,34 Kč	-78 803,03 Kč	-69 623,46 Kč

	year 11	year 12	year 13	year 14	year 15
Investments	0,00 Kč	0,00 Kč	0,00 Kč	0,00 Kč	0,00 Kč
Incoming Subsidies	0,00 Kč	0,00 Kč	0,00 Kč	0,00 Kč	0,00 Kč
Feed-in / Export Tariff	1 480,46 Kč	1 469,21 Kč	1 458,23 Kč	1 447,52 Kč	1 437,07 Kč
Electricity Savings	7 780,75 Kč	7 876,11 Kč	7 973,67 Kč	8 073,47 Kč	8 175,56 Kč
Annual Cash Flow	9 261,22 Kč	9 345,32 Kč	9 431,90 Kč	9 520,99 Kč	9 612,63 Kč
Accrued Cash Flow (Cash Balance)	-60 362,24 Kč	-51 016,93 Kč	-41 585,03 Kč	-32 064,04 Kč	-22 451,41 Kč

	year 16	year 17	year 18	year 19	year 20
Investments	0,00 Kč	0,00 Kč	0,00 Kč	0,00 Kč	0,00 Kč
Incoming Subsidies	0,00 Kč	0,00 Kč	0,00 Kč	0,00 Kč	0,00 Kč
Feed-in / Export Tariff	1 426,88 Kč	1 416,94 Kč	1 407,23 Kč	1 397,77 Kč	1 388,54 Kč
Electricity Savings	8 279,99 Kč	8 386,80 Kč	8 496,02 Kč	8 607,73 Kč	8 721,96 Kč
Annual Cash Flow	9 706,87 Kč	9 803,73 Kč	9 903,26 Kč	10 005,50 Kč	10 110,50 Kč
Accrued Cash Flow (Cash Balance)	-12 744,54 Kč	-2 940,81 Kč	6 962,45 Kč	16 967,95 Kč	27 078,45 Kč

Obr. 4.8 Propočet doby návratnosti FV systému

Pro lepší ilustraci doby návratnosti investice přikládám *Obr. 4.9*.

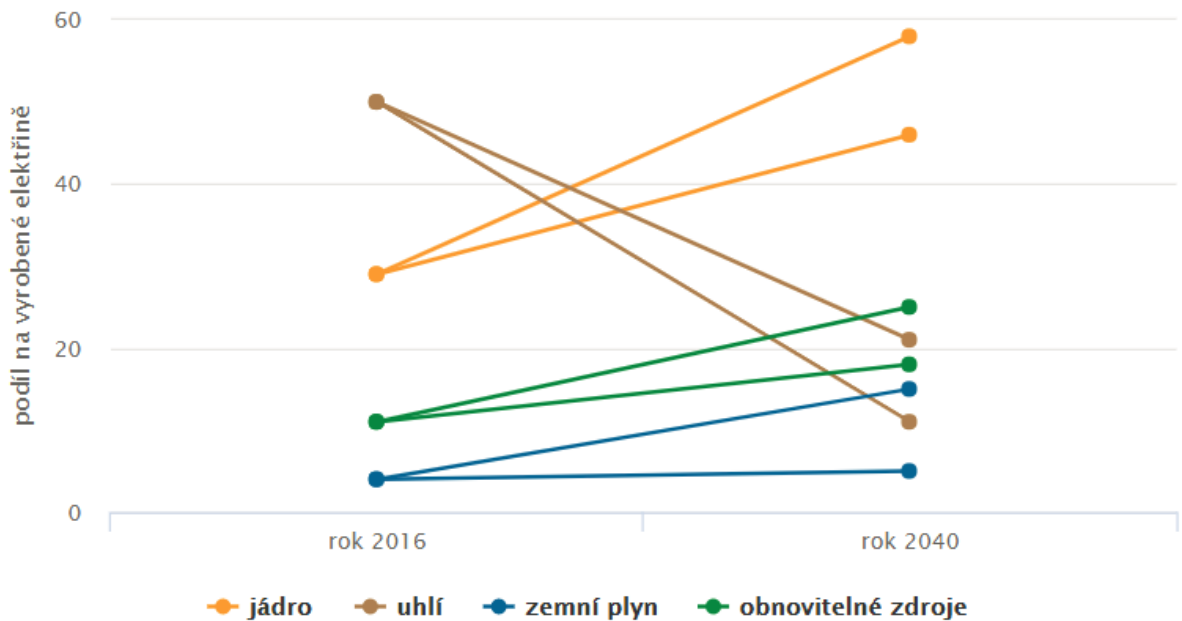


Obr. 4.9 Graf doby návratnosti investice

Po vyhodnocení ekonomické návratnosti obou modelových příkladů jsem zjistil, že za stávajících dotačních podmínek se z finančního hlediska vyplatí více instalovat systém bez akumulátoru.

4.3 Vývoj energetického trhu ČR do budoucna

V současné době se rozhoduje o energetickém mixu v České republice. Řeší se velká otázka, zda je výhodné postavit nové jaderné bloky v Dukovanech a Temelíně. Ty dnes vyrábějí zhruba třetinu energie produkované v Česku. V roce 2040 to má být, dle očekávání státní energetické koncepce schválené vládou pana Sobotky, více než polovina. Státní energetická koncepce uvádí cílové rozmezí podílu výrobních zdrojů na celkové vyrobené elektrické energii v České republice (*Obr. 4.10*).



Obr. 4.10 Možný vývoj podílu výrobních zdrojů na celkové vyrobené elektrické energii v ČR [49]

Mnoho odborníků se domnívá, že potřebujeme velké stabilní zdroje, aby byla v budoucnu zajištěna stabilita sítě. Padají otázky, ohledně zajištění dostatečného množství energie, až kolem roku 2035 dojde k odstavení Dukovan. Při současných cenách elektřiny se výstavba jaderných bloků nové generace ekonomicky nevyplácí. Česká energetika exportuje okolo 20 % vyrobené energie do zahraničí. Pokud by byly odstaveny pouze Dukovany, nebyl by to sám o sobě velký problém. Vyrobena energie z ostatních našich zdrojů by nám pro naše potřeby postačovala. Avšak vlivem zpřísnování emisních limitů se postupně bude odstavovat většina uhelných elektráren. Právě v tom, jak kompenzovat snížení tak velké výrobní kapacity, se experti neshodnou.

Elektřina je v současnosti tak levná, že se investice do její výroby nevyplácí. České velkoobchodní ceny elektřiny jsou určované trhem, takže jakmile klesne výrobní kapacita a vyroste cena, soukromí investoři začnou stavět nové zdroje. Podstatné přitom pro ně bude zejména to, do jaké míry se tyto zdroje budou schopné uplatnit na trhu, kde bude cena pravděpodobně silně kolísat v závislosti na počasí, a tedy dostupnosti elektřiny z obnovitelných zdrojů. O budoucí výrobní struktuře tak bude rozhodovat zejména flexibilita výroby. Tu nabízejí zejména plynové elektrárny. Česká republika má zásobníky plynu s kapacitou na třetinu její roční spotřeby, což je paradoxně největší “akumulátor“ energie, o kterém se ale moc nemluví.

V posledních letech je v Evropě tendence útlumu výstavby zdrojů jiných než obnovitelných. Ty jsou přímo závislé na počasí. Dá se předpokládat, že v budoucnu budou přebytky produkce v době, kdy intenzivně fouká vítr a svítí slunce. Na druhé straně ale bude problém zajistit elektřinu v době zimy, kdy bude vysoká spotřeba elektřiny a zároveň nebude dostatečně foukat vítr a svítit slunce. Zde se vkládají velké naděje do rozvoje akumulace elektrické energie.

Nastupující trend decentralizace výroby elektrické energie je vidět v České republice i po celé Evropě. Dotace z Evropské unie a státní podpory jednotlivých zemí tento proces ještě urychlují.

Při pohledu na jadernou energetiku v Evropě, zejména v západních zemích, lze pozorovat velký ústup od budování nových zdrojů.

Můj názor je ten, že u výstavby jaderné elektrárny se jedná o dlouhodobou, riskantní investici. Lze jen těžko predikovat, na jaké úrovni bude technologie akumulace elektrické energie okolo roku 2040, kdy by byly podle plánu uvedeny nové bloky jaderné elektrárny Dukovany do provozu. Při zvládnutí akumulace energie se může stát, že výstavba velkých centrálních zdrojů zaznamená ještě větší útlum. Výstavba nových jaderných zdrojů v ČR je v současné fázi v rovině politického rozhodnutí. Odhadovat, zda se skutečně budou stavět, se s jistotou říci nedá. Pokud by se ale jaderné elektrárny nestavěly, předpokládám posílení zdrojů využívajících zemního plynu.

I přes problémy, které OZE v současné době přinášejí, se v nich podle mého názoru skrývá budoucnost výroby elektrické energie. Na základě plánů Evropské rady pro rok 2030 (27 % podíl OZE z konečné spotřeby energií v EU) se dá očekávat jejich postupné další posilování. Společně s jejich začleňováním do ES předpokládám silný rozvoj akumulačních technologií.

Závěr

Cílem mé diplomové práce bylo vytvoření 2 modelových příkladů FV elektrárny v kombinaci s vhodnou akumulací energie v síti NN. Následně oba modely vyhodnotit z technologického i ekonomického hlediska. V rámci mé diplomové práce jsem měl možnost setkat se s lidmi a firmami, které se zabývají danou problematikou. Práci jsem konzultoval s panem Vladimírem Kučeravým (SOLAREN VY a.s.) Lubomírem Klobušníkem (IQ Energy), Martinem Míkem (INTERSEKCE alternativní energie s.r.o.), Radkem Vebrem (B64 sro.) a Jaromírem Pociďčem (Pinflow energy storage, s.r.o.).

Na začátku práce se věnuji dostupným technologiím akumulace. Uvádím vlastnosti jednotlivých možností a výhody, které využití úložišť energie přináší pro ES.

Jako dvě nejzajímavější technologie pro ukládání energie ze solárních elektráren se jeví elektrochemické baterie a vodík. Na porovnání těchto dvou možností jsem se zaměřil ve druhém bodě mé práce.

Třetí a čtvrtý bod práce je již přímo zaměřen na tvorbu dvou modelových příkladů fotovoltaické elektrárny s akumulací. Navrhnul jsem FV elektrárnu na rodinný dům v obci Zahájí na Českobudějovicku. Pro můj návrh jsem použil jeden z nejpropracovanějších softwarů na tuto problematiku od německé firmy Valintine Software – program PV*SOL premium.

V prvním modelovém příkladu jsem vytvořil systém akumulace přebytečné energie do ohřevu teplé užitkové vody, s možností získání dotace z programu Ministerstva životního prostředí – Nová zelená úsporám (NZÚ) v podoblasti podpory C.3.4. Ve druhém modelovém příkladu jsem použil jako primární akumulaci LiFePO₄ akumulátor s kapacitou 4.8 kWh, s možností získání dotace z programu NZÚ v podoblasti podpory C.3.6. Akumulátor jsem nadimenzoval tak, aby vycházel z ekonomického hlediska co nejlépe a neprodražoval zbytečně celý systém. Přebytečná energie, která nešla využít pro domácí spotřebiče ani akumulátor, byla použita, stejně jako v prvním modelovém příkladu, na ohřev teplé užitkové vody.

Teoretický předpoklad, výroby elektrické energie ze solárních panelů v České republice, je 1 000 kWh/kWp za rok. V mém modelovém příkladu jsem se dostal na výrobu 1 010 kWh/kWp za rok, což svědčí o správnosti použitých statistických dat slunečního osvětlení.

Hlavní rozdíl mezi oběma modelovými příklady byl ve schopnosti využití elektrické energie generované solárními panely. Systém bez akumulátoru byl schopen během jednoho roku v průměru využít 25 % elektrické energie pro spotřebiče v domácnosti, zatímco u systému s akumulátorem byla využitelnost energie pro domácí spotřebiče znatelně vyšší, a to 61 %. Další rozdíl byl v době návratnosti investice. Mnou navržený systém bez akumulátoru se splatí za 12 let provozu, oproti tomu systém s akumulátorem se splácí podstatně déle, zhruba 17 let. Pokud tedy budeme investici hodnotit čistě z ekonomického hlediska, za stávajících podmínek se vyplatí nainstalovat systém bez akumulátoru. Na druhé straně mnou navržený systém s akumulátorem zajistí nulové přetoky vyráběné elektrické energie zpět do sítě. Je zde také přidaná hodnota v možnosti chodu v ostrovním režimu. Při výpadku sítě s nabitým akumulátorem obyvatelé rodinného domu ani nepoznají, že k výpadku došlo.

Uvádím, že jsem nezahrnul do ceny obou instalací případnou cenu potřebné údržby, která by dobu návratnosti ještě prodloužila.

Se snižováním cen elektrochemických baterií, do budoucna předpokládám postupný nárůst výstavby FV elektráren s akumulátory, na úkor FV elektráren bez nich.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] *HASELHUHN, Ralf a Petr MAULE. Fotovoltaické systémy: energetická příručka: pro elektrikáře, techniky, instalatéry, projektanty, architekty, inženýry, energetiky, manažery, stavitele, studenty, učitele, ostatní odborné a profesní soukromé nebo veřejné instituce a zájemce o fotovoltaický obor a energetickou nezávislost. Přeložil Anna ROHÁČOVÁ, přeložil Pavel ROHÁČ, přeložil Anna ŽENÍŠKOVÁ, přeložil Eva HOŘEJŠÍ, přeložil Jana KLAMO, přeložil Jitka HICKOVÁ, přeložil Veronika MARTINOVSKÁ, přeložil Tomáš BAROCH. Plzeň: Česká fotovoltaická asociace, 2017. ISBN 978-80-906281-5-1.*
- [2] *2030 Energy Strategy [online]. [cit. 2017-12-18]. Dostupné z: <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-strategy-and-energy-union/2030-energy-strategy>*
- [3] *AKINYELE, D.O. a R.K. RAYUDU. Review of energy storage technologies for sustainable power networks. Sustainable Energy Technologies and Assessments [online]. 2014, 8, 74-91 [cit. 2017-12-20]. DOI: 10.1016/j.seta.2014.07.004. ISSN 22131388. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2213138814000708>*
- [4] *IBRAHIM, Hussein a Adrian ILINC. Techno-Economic Analysis of Different Energy Storage Technologies. ZOBAA, Ahmed, ed. Energy Storage - Technologies and Applications [online]. InTech, 2013, 2013-01-23 [cit. 2018-01-21]. DOI: 10.5772/52220. ISBN 978-953-51-0951-8. Dostupné z: <http://www.intechopen.com/books/energy-storage-technologies-and-applications/techno-economic-analysis-of-different-energy-storage-technologies>*
- [5] *LUO, Xing, Jihong WANG, Mark DOONER a Jonathan CLARKE. Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation. Applied Energy [online]. 2015, 137, 511-536 [cit. 2018-01-18]. DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.09.081. ISSN 03062619. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261914010290>*
- [6] *ZHANG, Chao, Yi-Li WEI, Peng-Fei CAO a Meng-Chang LIN. Energy storage system: Current studies on batteries and power condition system. Renewable and Sustainable Energy Reviews [online]. 2018, 82, 3091-3106 [cit. 2018-01-27]. DOI: 10.1016/j.rser.2017.10.030. ISSN 13640321. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032117314077>*

- [7] CAES: A simple idea but a difficult practice [online]. [cit. 2018-01-23]. Dostupné z: <http://energystoragesense.com/uncategorized/caes-a-simple-idea-but-a-difficult-practice/>
- [8] DOE Global Energy Storage Database [online]. [cit. 2018-01-24]. Dostupné z: http://www.energystorageexchange.org/projects?utf8=%E2%9C%93&technology_type_sort_eqs=&technology_type_sort_eqs_category=&technology_type_sort_eqs_subcategory=&country_sort_eq=&state_sort_eq=&kW=&kWh=&service_use_case_inf=&ownership_model_eq=&status_eq=&siting_eq=&order_by=&sort_order=&search_page=&size_kw_ll=&size_kw_ul=&size_kwh_ll=&size_kwh_ul=&show_unapproved=%7B%7D
- [9] Přecherčpávací vodní elektrárny v České republice [online]. [cit. 2018-01-24]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/elektrina/precerpavaci-vodni-elektrarny-v-ceske-republice/>
- [10] Největší baterie světa: výkon 200 MW, kapacita 800 MWh [online]. [cit. 2018-01-25]. Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/nejvetsi-baterie-sveta-vykon-200-mw-kapacita-800-mwh>
- [11] Solární elektrárna o výkonu 2,6 kWp na klíč [online]. [cit. 2018-02-05]. Dostupné z: <https://www.solarniexpert.cz/solarni-systemy/fotovoltaika/fotovoltaicka-elektrarna-fve-o-vykonu-26-kwp-na-klic/>
- [12] VOHLÍDAL, Jiří a Karel ŠTULÍK. *Chemické a analytické tabulky*. Praha: Grada, 1999. ISBN 8071698555.
- [13] KPMG Global Automotive Executive Survey 2018 [online]. [cit. 2018-02-13]. Dostupné z: <https://home.kpmg.com/cz/cs/home/pro-media/tiskove-pravy/2018/01/gaes-2018.html>
- [14] RIGAS, Fotis. a Paul. AMYOTTE. *Hydrogen safety*. Boca Raton: CRC Press, c2013. ISBN 978-143-9862-315.
- [15] TUČEK, Vít, Ludmila DOVŘÁKOVÁ a Jiří HANZAL. *Vodík* [online]. [cit. 2018-02-16]. Dostupné z: <http://www.catp.cz/publikace/vodik.pdf>
- [16] DOUČEK, Aleš, Daniel TENKRÁT a Petr DLOUHÝ. *Vodíkové hospodářství a možnosti využití vodíku k regulaci obnovitelných zdrojů energie* [online]. [cit. 2018-02-22]. Dostupné z: <http://paliva.vscht.cz/cz/archiv-clanku/detail/10>
- [17] GREENWOOD, N. N. a Alan EARNSHAW. *Chemie prvků*. Praha: Informatorium, 1993. ISBN 8085427389.

- [18] DLOUHÝ, Petr a Luděk JANÍK. Skladování vodíku I. In: www.hytep.cz [online]. [cit. 2018-02-27]. Dostupné z: <http://www.hytep.cz/cz/clanky/kategorie-clanku/clanky/412-skladovani-vodik-u>
- [19] *TRANSPORT A SKLADOVÁNÍ VODÍKU* [online]. [cit. 2018-03-02]. Dostupné z: <https://www.hytep.cz/cs/vodik/informace-o-vodiku/transport-a-skladovani-vodik-u/618-skladovani-vodik-u>
- [20] *Akumulace energie z OZE ve vodíku* [online]. [cit. 2018-03-03]. Dostupné z: <http://www.proelektrotechniky.cz/obnovitelne-zdroje/77.php>
- [21] GIANNAKOUDIS, Garyfallos, Athanasios I. PAPAPOPOULOS, Panos SEFERLIS a Spyros VOUTETAKIS. Optimum design and operation under uncertainty of power systems using renewable energy sources and hydrogen storage. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2010, 35(3), 872-891 [cit. 2018-03-03]. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2009.11.044. ISSN 03603199. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319909018138>
- [22] *Současné možnosti akumulace elektrické energie* [online]. [cit. 2018-03-11]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/17908638-Soucasne-moznosti-akumulace-elektricke-energie.html>
- [23] *WANT TO KNOW MORE ABOUT SONNEN?* [online]. [cit. 2018-03-12]. Dostupné z: <https://www.cclcomponents.com/blog/2018/02/06/want-to-know-more-about-sonnen-we-have-the-answers/>
- [24] *Li-ion baterie: principy, provoz, rady* [online]. [cit. 2018-03-12]. Dostupné z: <https://www.cnews.cz/li-ion-baterie-principy-provoz-rady-1-cast/>
- [25] *Soft Batteries | Designed for Industry* [online]. Copyright © Saft2018 [cit. 2018-3-13]. Dostupné z: <https://www.saftbatteries.com/doc/Documents/defence/Cube769/VL45EFe.e3741a09-74fd-4df4-8687-12997f445ef5.pdf>
- [26] *Lithium iron phosphate based battery – Assessment of the aging parameters and development of cycle life model* [online]. [cit. 2018-03-13]. Dostupné z: https://ac.els-cdn.com/S0306261913007393/1-s2.0-S0306261913007393-main.pdf?tid=c4e6945b-8d60-4f3d-ae18-7656e1b947be&acdnat=1520890689_fe0ab1d14f2b29db19ad5e16465293dd
- [27] *Baterie minulost, současnost a perspektivy* [online]. [cit. 2018-03-14]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/13215858-Baterie-minulost-soucasnost-a-perspektivy.html>
- [28] *V Mydlovarech se objevilo největší bateriové úložiště v České republice* [online]. [cit. 2018-03-16]. Dostupné z:

- <http://www.rozhlas.cz/cb/zpravodajstvi/zprava/v-mydlovarech-se-objevilo-nejvetsi-bateriove-uloziste-v-ceske-republice--1786305>
- [29] Němci vyvíjejí náhradu lithiových baterií. S revoluční technologií pomáhají i čeští studenti Více na: https://www.euro.cz/byznys/nahrada-lithiovych-baterii-ukladani-energie-cesi-1380201#utm_medium=selfpromo&utm_source=euro&utm_campaign=copylink [online]. [cit. 2018-03-16]. Dostupné z: <https://www.euro.cz/byznys/nahrada-lithiovych-baterii-ukladani-energie-cesi-1380201>
- [30] Kam s elektrinou? Řešením mohou být vanadové průtočné baterie [online]. [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: <https://www.vscht.cz/popularizace/doktorandipisou/kam-s-elektrinou>
- [31] Technical Data sonnenBatterie hybrid 8.1 [online]. [cit. 2018-03-14]. Dostupné z: https://sonnenbatterie.de/sites/default/files/170627_datenblatt_sonnenbatterie_hybrid8.1_batteriepack_row.pdf
- [32] Galvanický článek [online]. [cit. 2018-03-22]. Dostupné z: <http://www.wikiwand.com/cs/Galvanick%C3%BD%C4%8DI%C3%A1nek>
- [33] Lithium-ion Battery Costs and Market [online]. [cit. 2018-03-22]. Dostupné z: <https://data.bloomberglp.com/bnef/sites/14/2017/07/BNEF-Lithium-ion-battery-costs-and-market.pdf>
- [34] BU-107: Comparison Table of Secondary Batteries [online]. [cit. 2018-03-26]. Dostupné z: http://batteryuniversity.com/learn/article/secondary_batteries
- [35] Olověné akumulátory [online]., 21 [cit. 2018-03-26]. Dostupné z: <http://canov.jergym.cz/elektro/clanky2/olov.pdf>
- [36] Analysis of Vanadium Redox Flow Battery Cell with Superconducting Charging System for Solar Energy [online]. [cit. 2018-03-28]. Dostupné z: <http://article.sapub.org/10.5923.j.eee.20160601.01.html#Abs>
- [37] Akumulace elektrické energie v elektrizačních soustavách [online]. Praha, 2017 [cit. 2018-04-04]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/68400/F3-BP-2017-Jirat-Daniel-Akumulace%20elektricke%20energie%20v%20elektrizacnich%20soustavach.pdf?sequence=1>. Bakalářská práce. ČVUT.
- [38] VYUŽÍVEJTE VYROBENOU ELEKTRINU NAPLNO [online]. [cit. 2018-04-05]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/sluzby-pro-zakazniky/fotovoltaika.html>
- [39] GOEBEL, Christoph, Vicky CHENG a Hans-Arno JACOBSEN. Profitability of Residential Battery Energy Storage Combined with Solar

- Photovoltaics. Energies* [online]. 2017, 10(7), 976- [cit. 2018-04-11]. DOI: 10.3390/en10070976. ISSN 1996-1073. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1996-1073/10/7/976>
- [40] *Pravidla provozování distribučních soustav*. [online]. [cit. 2018-04-17]. Dostupné z: https://www.eru.cz/documents/10540/2041318/CEZ_P%C5%99%C3%ADloha+%C4%8D.+4.pdf/7b16c2c8-47c8-4dcf-91a2-9a89d56e2bd9
- [41] *Vývoj výkupních cen větrné energie a ostatních obnovitelných zdrojů* [online]. [cit. 2018-04-18]. Dostupné z: <http://csve.cz/clanky/vyvoj-vykupnich-cen-vetrne-energie-a-ostatnich-obnovitelnych-zdroju/278>
- [42] *NZÚ - Podmínky oblasti podpory C* [online]. [cit. 2018-04-18]. Dostupné z: <http://www.novazelenausporam.cz/podminky-oblasti-podpory-c-3-vyzva/>
- [43] *Potřeba tepla pro vytápění a ohřev teplé vody* [online]. [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/47-potreba-tepla-pro-vytapani-a-ohrev-teple-vody>
- [44] *GWL/Power Solární panel CanadianSolar Poly 280Wp 60 cells (CS6K-280P)* [online]. [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: <https://www.i4wifi.cz/Baterie-a-nabijeni/solarni-panely/Solarni-panel-CanadianSolar-Poly-280Wp-60-cells-CS6K-280P.html>
- [45] *Kostal Piko 3.0* [online]. [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: <http://shop.solarpartner.cz/kostal-piko-3-0-2>
- [46] *Baterie Pylontech US2000 Plus - 2.4kWh* [online]. [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: <https://www.solidpower.cz/baterie-pylontech-us2000-plus-2-4kwh-p294/>
- [47] *Baterie Pylontech US2000B Plus* [online]. [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: <http://shop.solarpartner.cz/baterie-pylontech-us2000b-plus>
- [48] *Cenový kalkulátor* [online]. [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: <http://kalkulator.eru.cz/VstupniUdaje.aspx>
- [49] *STÁTNÍ ENERGETICKÁ KONCEPCE ČESKÉ REPUBLIKY* [online]. [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/assets/dokumenty/52841/60959/636207/priloha006.pdf>
- [50] *V JVTP zprovozněna vanadiová baterie - první svého druhu v ČR* [online]. [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: <http://www.jvtp.cz/aktuality/v-jvtp-zprovoznena-vanadiova-baterie-prvni-sveho-druhu-v-cr.html>