

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Možnost akumulace elektrické energie pomocí
elektrochemických baterií**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Vít POKORNÝ**
Osobní číslo: **E14N0069P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektroenergetika**
Název tématu: **Možnost akumulace elektrické energie pomocí elektrochemických baterií**
Zadávací 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 :

Diplomová práce "Možnost akumulace elektrické energie pomocí elektrochemických baterií" bude zaměřena na tyto body:

1. Zhodnoťte přínosy a způsoby využití elektrochemických baterií v sítích nn.
2. Uveďte technologické parametry používaných baterií a proveďte jejich vzájemné porovnání.
3. Pro konkrétní situaci zpracujte modelový případ sítě nn s aplikací akumulačních stanic.
4. Vyhodnoťte použití baterií v sítích nn.



Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Skripta k předmětu Teorie přenosu a rozvodu elektrické energie.
2. Elektroenergetika I, II.
3. Internetové podklady.
4. Dle uvážení a pokynů udá konzultant.

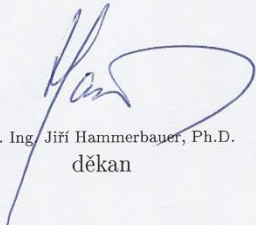
Vedoucí diplomové práce:

Doc. Ing. Lucie Noháčová, Ph.D.

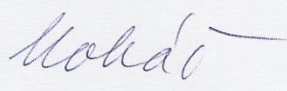
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: 14. října 2016

Termín odevzdání diplomové práce: 19. května 2017


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




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

V Plzni dne 14. října 2016

Abstrakt

Práce se zaměřuje na řešení současné problematiky spojené se začleňováním stále většího počtu instalovaných obnovitelných zdrojů elektrické energie do energetického mixu. Jedním z řešení pro lepší integraci těchto zdrojů je využití akumulace, a to je předmětem této práce, konkrétně akumulace pomocí elektrochemických baterií.

První tři kapitoly mají za cíl představit akumulaci v jednotlivých částech sítě a poukázat na potenciální přínos při využití akumulace společně s obnovitelnými zdroji energie, především tedy při využití u fotovoltaické elektrárny. Dále jsou zde uvedeny jednotlivé technologie elektrochemických článků a jejich vzájemné porovnání.

Praktická část práce je zpracována v kapitole čtyři a pět. Zde je na modelovém příkladu demonstrováno využití fotovoltaické elektrárny spolu s velkokapacitní baterií. Pomocí výpočtů a analýzy jsou dokázány přínosy tohoto systému a zároveň jsou zde navrženy možnosti na další rozšíření vlastností celého systému, například pro řízení přetoků činných a jalových výkonů. Poslední kapitola se věnuje ekonomickému vyhodnocení akumulace. Součástí tohoto zhodnocení je návrh systémů motivujících provozovatele obnovitelného zdroje k pořízení akumulace. Konkrétně je zde navržena penalizace za nedodržení nasmlouvané dodávky elektrické energie. Na základě těchto podkladů je poté vypočtena prostá návratnost bateriového úložiště.

Klíčová slova

Obnovitelné zdroje energie; fotovoltaika; akumulace energie; baterie; akumulátor; predikce výroby; penalizace; řízení výkonových toků; kapacita akumulátoru; problematika obnovitelných zdrojů.

Abstract

The thesis is focused on solving the current problems connected with the integration of an increasing number of installed renewable energy sources into the energy mix. One of the solutions for better integration of these sources is the use of accumulation and this is the subject of the thesis, specifically the accumulation by using electrochemical batteries.

The first three chapters intend to present the accumulation in each part of the electrical grid and to point out the potential benefits of using accumulation together with renewable energy sources, especially in the use with photovoltaic power plant. There are also mentioned technologies of electrochemical cells and their mutual comparison.

The practical part of the thesis is elaborated in chapters four and five. There is a model demonstrating the use of the photovoltaic power plant along with the large-capacity battery storage. By using calculations and analysis are proven benefits of this system and at the same time there are designed options for further expansion of the features of the whole system, for example, to control overflows of active and reactive power. The last chapter deals with the economic analysis of the accumulation. As part of this analysis there is the proposition of systems that should motivate owners of renewable sources to acquire accumulation. Specifically, there is a proposition for penalizing nonobservance of the contracted power supply. On these bases is calculated a simple return of battery storage.

Key words

Renewable energy sources; photovoltaic; energy accumulation; battery; storage battery; prediction of energy generation; penalization; control of power flow; battery capacity; the issue of renewable sources.

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 16.5.2017

Vít Pokorný

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval paní Doc. Ing. Lucii Noháčové, Ph.D. za vstřícnost, připomínky a metodické vedení mé diplomové práce.

Děkuji také konzultantovi Ing. Františku Žákovi, Ph.D. za jeho cenné profesionální rady a za čas, který mi věnoval.

Dále děkuji své rodině za jazykovou korekturu této práce a především za veškerou podporu poskytnutou při celé délce mého studia.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	11
ÚVOD.....	14
1 AKUMULACE ENERGIE.....	15
1.1 MOŽNOSTI AKUMULACE ENERGIE.....	16
1.2 PŘÍNOSY POUŽITÍ BATERIÍ.....	20
1.3 UMÍSTĚNÍ AKUMULÁTOROVÝCH BATERIÍ V ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVĚ	23
2 AKUMULÁTORY	26
2.1 PARAMETRY AKUMULÁTORŮ.....	26
2.1.1 <i>Kapacita</i>	26
2.1.2 <i>Hustota energie</i>	26
2.1.3 <i>Měrný výkon</i>	27
2.1.4 <i>Napětí</i>	27
2.1.5 <i>Energetická účinnost</i>	28
2.1.6 <i>Životnost</i>	28
2.1.7 <i>Rozsah pracovních teplot</i>	29
2.1.8 <i>Samovybíjení</i>	30
2.1.9 <i>Rychlost nabíjení</i>	30
2.1.10 <i>Velikost vybíjecího proudu</i>	30
2.2 TYPY SEKUNDÁRNÍCH ČLÁNKŮ.....	30
2.2.1 <i>Lithium (Li)</i>	30
2.2.2 <i>Olovo (Pb)</i>	31
2.2.3 <i>Nikl-kadmium (Ni-Cd)</i>	32
2.2.4 <i>Nikl-metal-hydrid (NiMH)</i>	32

2.2.5	<i>Průtokové</i>	33
2.2.6	<i>Ostatní</i>	34
2.3	POROVNÁNÍ JEDNOTLIVÝCH TYPŮ	34
3	FOTOVOLTAICKÁ ELEKTRÁRNA BEZ AKUMULACE ENERGIE	37
3.1	DOPADY PŘIPOJENÍ FOTOVOLTAICKÉ ELEKTRÁRNY NA ELEKTRIZAČNÍ SÍŤ	37
3.1.1	<i>Zvýšené napětí</i>	38
3.1.2	<i>Odchylky a nesymetrie napětí</i>	38
3.1.3	<i>Změny frekvence</i>	39
3.1.4	<i>Přetoky činných a jalových výkonů</i>	40
3.1.5	<i>Flikr</i>	41
4	FOTOVOLTAICKÁ ELEKTRÁRNA S AKUMULACÍ ENERGIE	42
4.1	MODELOVÝ PŘÍKLAD DISTRIBUČNÍ SÍŤE S FVE A AKUMULACÍ	42
4.2	ÚČEL AKUMULACE U OZE.....	45
4.3	VÝPOČET POTŘEBNÉ KAPACITY BATERIE PRO KONSTANTNÍ VÝKON	45
4.4	OPTIMALIZACE KAPACITY PRO POKRYTÍ ZATÍŽENÍ.....	48
4.4.1	<i>Omezení přetoků P a Q</i>	50
4.5	PŘIPOJENÍ FV ELEKTRÁRNY S AKUMULACÍ K DISTRIBUČNÍ SÍŤI.....	51
4.5.1	<i>Výpočet výchozích parametrů sítě</i>	53
4.5.2	<i>Napěťové poměry po připojení zdroje</i>	54
4.6	PŘÍNOSY AKUMULACE Z HLEDISKA LOKÁLNÍCH A SYSTÉMOVÝCH VLIVŮ	57
5	ZHODNOCENÍ AKUMULACE POMOCÍ BATERÍ.....	60
5.1	AKUMULÁTOR PRO KONSTANTNÍ VÝKON.....	60
5.2	AKUMULÁTOR S OPTIMALIZOVANOU KAPACITOU.....	62
5.2.1	<i>Využití u LDS</i>	63
5.3	LEGISLATIVA.....	64

ZÁVĚR	65
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	68
PŘÍLOHA A: POROVNÁNÍ PARAMETRŮ SEKUNDÁRNÍCH ČLÁNKŮ.....	1
PŘÍLOHA B: VÝPOČET ÚBYTKŮ NAPĚTÍ.....	2

Seznam symbolů a zkratk

Značka	Veličina	Jednotka
C_{fikt}	Fiktivní kapacita	Ah
$U_{\text{článku}}$	Napětí článku	V
$U_{\text{zař}}$	Napětí zařízení	V
η_{bat}	Účinnost baterie	%
$U_{\text{vybíjecí}}$	Vybíjecí napětí	V
$U_{\text{nabíjecí}}$	Nabíjecí napětí	V
$Q_{\text{vybíjecí}}$	Vybíjecí náboj	C
$Q_{\text{nabíjecí}}$	Nabíjecí náboj	C
$U_{(2)}$	Zpětná složka napětí	V
$U_{(1)}$	Sousledná složka napětí	V
u_2	Stupeň nesymetrie napětí	%
P_{st}	Míra vjemu krátkodobého flikru	-
P_{lt}	Míra vjemu dlouhodobého flikru	-
U_{n}	Jmenovité napětí	V
W_{ak}	Uložená energie respektující vlastnosti baterie	kWh
W_{bat}	Využitelná energie	kWh
$W_{\text{ak,celk}}$	Celková energie uložená v baterii	kWh
D	Počet dní	-
P_{ref}	Maximální dosažitelný výkon	kW
P_{N}	Instalovaný výkon elektrárny	MW
U_{s}	Napětí sítě	V
U_1	Napětí generované střídačem	V
$Z_{\text{k,T1}}$	Impedance transformátoru	Ω
$R_{\text{k,T1}}, R_{\text{V1}}$	Rezistance transformátoru a vedení	Ω
$X_{\text{T1}}, X_{\text{V1}}$	Reaktance transformátoru a vedení	Ω
ΔU_1	Úbytek napětí	V
$\Delta u_{\%}$	Procentní úbytek napětí	%
$\cos\varphi$	Účinník	-
P	Činný výkon	W
Q	Jalový výkon	VAr
$Inv1$	Investiční náklady na akumulaci	Kč
CS_{LiFePO4}	Cena článku za 1 kWh	\$/kWh

k	Kurz dolaru vůči koruně	Kč/\$
W_{penal}	Energie účtovaná za nižší cenu	MWh
W_{rok}	Energie vyrobená za rok	MWh
$\delta_{\text{klad}}, \delta_{\text{záp}}$	Kladná a záporná odchylka	%
PB	Prostá návratnost	roky
$C_{\text{výk}}$	Výkupní cena elektřiny	Kč/MWh
C_{dot}	Dotace	Kč
$C_{\text{měs}}$	Měsíční smluvní vyplácená částka	Kč

OZE.....	Obnovitelné zdroje energie
FVE.....	Fotovoltaická elektrárna
DDZ.....	Diagram denního zatížení
ARES.....	Advanced rail energy storage (akumulační železnice)
SMES.....	Superconductive magnetic energy storage (supravodivá cívka)
CAES.....	Compressed air energy storage (energie ve stlačeném vzduchu)
ESS.....	Energy storage systems (systém skladování energie)
DOD.....	Depth of discharge (hloubka vybití)
VRLA.....	Valve regulated lead acid (ventilem řízené olověné akumulátory)
HDO.....	Hromadné dálkové ovládání
PDS.....	Provozovatel distribuční soustavy
VN.....	Vysoké napětí
NN.....	Nízké napětí
DTS.....	Distribuční transformátorová stanice
PS.....	Přenosová soustava
DS.....	Distribuční soustava
Li.....	Lithium
Pb.....	Olovo
NiMH.....	Nikl-metal hydrid
NiCd.....	Nikl-kadmium
LiFePO ₄	Lithium-železo-fosfát
LiCoO ₂	Lithium-cobalt-dioxid
LiNiO ₂	Lithium-nickel-dioxid
Li(NiMnCo)O ₂	Lithium (nickel-manganese-cobalt) dioxid
NMC.....	Nickel-manganese-cobalt

NaS.....	Sodium-sulfur
VRB	Vanadium redox battery
ZnBr	Zinc-bromide
PSB	Polysulfide-bromide
STATCOM	Static synchronous compensator (statický synchronní kompenzátor)
PVGIS	Photovoltaic Geographical Information System
BESS	Battery energy storage system
LDS	Lokální distribuční soustava
OTE.....	Operátor trhu s elektřinou
ERÚ	Energetický regulační úřad

Úvod

Obnovitelná energie se v dnešní době jeví jako možnost snížit emise CO₂ způsobené výrobou elektrické energie pomocí fosilních zdrojů a jako cesta k lepšímu a méně znečištěnému prostředí. Je vyvíjen velký tlak na začlenění těchto zdrojů do energetického mixu. S jejich aplikací jsou však spojeny mnohé komplikace.

Jednou z hlavních komplikací je, že jsou těžko predikovatelné a jejich výroba je kolísavá. Dále je obtížné jejich výkon regulovat, tudíž veškerá vyrobená energie je ihned odesílána do sítě. Problematiku dopadu vysoké penetrace obnovitelných zdrojů podrobněji popisují v kapitole 3. Jedním z řešení, jak zlepšit dopady OZE na síť, je využití akumulace a to jsem se rozhodl zkoumat v této práci, konkrétně akumulaci pomocí elektrochemických baterií.

V práci se zaměřím na návrh takové kapacity bateriového systému, která by byla využitelná u fotovoltaické elektrárny o výkonu 1 MVA a zajistila by konstantní dodávku výkonu po celý den. Tím by se výrazně snížily negativní dopady zdroje na síť. Důkaz, že dojde ke zlepšení stability sítě, uvedu na modelovém příkladu v kapitole 4.

Jelikož lze předpokládat, že baterie pro účely konstantní dodávky výkonu z FVE bude vyžadovat příliš velkou kapacitu, se kterou je spojena vysoká investiční cena, bude potřeba tuto kapacitu optimalizovat a uvažovat při řešení také zatížení oblasti. Výsledkem bude návrh takového systému, který akumuluje výrobní špičky v poledních hodinách a tuto energii opět využívá při večerních hodinách v období vysoké spotřeby. Dále u této baterie uvedu možnost doplnit systém o řízení přetoků činných a jalových výkonů v uzlu soustavy.

Mnou navrhovaná řešení nemohou vzniknout, pokud nebudou investory dostatečně ekonomicky motivovat. Proto v kapitole 5 zanalyzuji výhodnost těchto systémů a ekonomicky zhodnotím jejich návratnost.

Oba tyto návrhy jsou vypracovány s cílem vytvořit modelový příklad aplikace vysokokapacitní baterie a poskytnout tak podklady pro budoucí realizace stejného nebo podobného projektu.

1 Akumulace energie

Již od vynalezení elektřiny řešíme otázky s jejím uskladněním. Nejužitečnější a ekonomicky nejvýhodnější vždy bylo pokrývat aktuální poptávku odpovídající nabídkou, avšak s postupným vývojem obnovitelných zdrojů a globálním tlakem v oblasti snižování emisí vystupují otázky ohledně ukládání energie stále více do popředí. Uhelné elektrárny, které jsou stále ještě ekonomicky nejvýhodnější zdroj energie, mají zásadní problém a tím je ekologie. Jejich produkce emisí z velké části ovlivňuje zemské klima, a tudíž je snaha o jejich nahrazení obnovitelnými zdroji energie (OZE).

OZE patří mezi primární zdroje energie a z toho důvodu jsou také v pokrývání spotřeby prioritně nasazovány. Ovšem jejich nevýhodou je neregulovatelnost a proměnlivá výroba elektřiny závislá na aktuálních atmosférických podmínkách. Evropská unie si dala za cíl do roku 2020 dosáhnout 20% podílu energie z obnovitelných zdrojů na hrubé konečné spotřebě energie [6]. Cílem České republiky je dosáhnout 13% podílu z OZE do roku 2020. Tato hranice u nás již byla dosažena v roce 2013 [7]. Z těchto zpráv je jasné, že důležitost OZE stále roste a bude růst. S tím ovšem rostou problémy s regulovatelností soustavy.

V současné době se regulace řeší pomocí zdrojů energie, které patří do skupiny tzv. špičkových zdrojů. Jejich největší předností je schopnost velmi rychlého dodání potřebné energie. Mezi hlavními zástupci v této skupině jsou přečerpávací a paroplynové elektrárny. Dalším řešením regulace je mezinárodní obchod s energií. Ovšem výkup a prodej elektřiny je z ekonomického hlediska stále měnící se hodnota a se silícím vlivem obnovitelných zdrojů by mohla nastat situace, kdy v zimním období budou tyto zdroje vyrábět málo elektřiny a nebude odkud energii čerpat, tím cena elektřiny značně poroste. Zde se otevírají možnosti pro využití systémů umožňující akumulaci energie, které by vyřešily problémy s rostoucí kapacitou obnovitelných zdrojů.

Technologie akumulace energie se vztahuje k procesu ukládání vyrobené energie pro její budoucí zpracování v případě potřeby. Obecně přináší akumulace pro elektrickou síť tyto výhody [1]:

- pomoc při řešení špiček elektrické spotřeby,
- zmírnění přerušované výroby z OZE,
- zlepšení kvality a spolehlivosti dodávek energie,

- podpora realizace chytrých sítí (smart grids),
- pomoc při pohotovostní potřebě energie,
- snížení elektrického dovozu energií při špičkách poptávky.

S výhledem do budoucna nás s velkou pravděpodobností také čeká změna v diagramu denního zatížení elektrické energie (DDZ). Důvodem bude využívání elektromobilů. Dopravní návyky lidí budou mít vliv na velikosti výkyvů spotřeby energie. V tomto případě by opět mohla být nápomocná akumulace energie, která by s okamžitostí dokázala dodat do sítě velký tok energie a pokrýt tak denní špičky spotřeby.

1.1 Možnosti akumulace energie

Nyní uvedu několik možností, kterými lze uskutečnit akumulaci v elektrizační soustavě:

- **Přečerpávací vodní elektrárny**

Jedna z nejvyužívanějších možností akumulace a technologicky již velmi propracovaná přečerpávací elektrárna funguje na principu uložení elektrické energie ve formě potenciální energie vody. Voda je v době nízké spotřeby čerpána ze spodní nádrže do horní a v době špičkové spotřeby je vpuštěna přes přívodní potrubí na lopatky turbíny, která je propojena s generátorem a ten odesílá výkon dále do sítě.

V současné době jsou v České republice 3 přečerpávací vodní elektrárny (Štěchovice II, Dalešice, Dlouhé Stráně I) o celkovém instalovaném výkonu 1 170 MW [3]. Jejich funkce v síti je význačná a v současnosti nenahraditelná. Avšak velkou nevýhodou je v první řadě umístění této elektrárny. Dále pak její mohutnost a s tím spojené vysoké náklady na stavbu.

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

Tento princip je do značné míry ekvivalentní k přečerpávací elektrárně z hlediska jejich aplikace, kapacity a skladování. Ale namísto přečerpávání energie z dolní nádrže do horní v době přebytku je zde využito stlačování okolního vzduchu pomocí kompresorů a ukládání tohoto vzduchu pod zem. Při potřebě energie je stlačený vzduch ohříván, tím je vytlačován zpět nahoru, kde ústí do expanzní turbíny, která pak dále pohání generátor pro výrobu elektrické energie. Zkratka CAES pochází z anglického Compressed Air Energy Storage [4].

První projekt tohoto typu byl realizován v německém městě Huntorf roku 1974, kde je elektrárna provozována společností E.ON a dosahuje výkonu 290 MW. Tento výkon je schopna udržet 2 hodiny provozu [5]. Nevýhodou tohoto systému je účinnost, která dosahuje

55 % a stejně jako u přečerpávacích elektráren je zde problém s umístěním, neboť je potřeba hlubokých vrtů pro vytvoření dostatečných zásobníků vzduchu a zajištění dostatečné těsnosti.

- **Akumulace ve vodíku**

Jedná se o princip, kdy se pomocí elektrické energie pohání zařízení, které elektrolýzou vody vyrábí vodík. Ten se dále odebírá a uskládňuje do vhodného zásobníku. V době potřeby se vodík přemění na elektrickou energii pomocí palivového článku.

Tento princip je předmětem výzkumu nejedné společnosti. V České republice testují již funkční model tohoto systému, kde využívají vodíkový zásobník v kombinaci s olověným akumulátorem. V současnosti má vodíková akumulace velmi malou účinnost (cca pod 50 %), což je dáno především napájením elektrolyzéry na výrobu vodíku [8]. Další nevýhodou je náročnost na skladování vodíku, je zapotřebí dodržet naprostou těsnost nádoby, kvůli možné explozi v kombinaci s kyslíkem. Velkou výhodou je možnost akumulace po dlouhou dobu a oproti přečerpávacím elektrárnám daleko menší nároky na prostor a náročnost výstavby. Vodíková akumulace je ve fázích vývoje a tento systém se do budoucna zdá velmi ambiciózní.

- **Setrvačnick**

Setrvačnick akumuluje energii v podobě rotační (kinetické) energie. Jde o rotor umístěný ve vakuu, který se při přebytku energie roztáčí a v době nedostatku se brzdí a energie se zpátky odebírá. Rozběh a brždění umožňují elektromagnety.

Ve Spojených státech již fungují některé projekty využívající pro akumulaci setrvačnick. Například ve státě Pensylvánie v městě Hazle, kde od roku 2014 funguje 200 setrvačnick spojených paralelně o celkovém výkonu 20 MW [9]. Výhodou těchto systémů je nízká cena investičních nákladů, jednoduchá instalace, vysoká účinnost (cca 95 %) a velmi rychlá dodávka energie. Zásadní nevýhodou je však krátká doba uskladnění. Systém je ve fázích vývoje, ačkoliv již některé elektrárny fungují na tomto principu, ještě není otestována jejich životnost.

- **Superkapacity**

Superkapacitor, nebo také superkondenzátor, je tvořen dvojicí elektrod, jejichž povrch pokrývá vysoce pórovitá vodivá látka. Dále obsahuje elektrolyt a membránu (separátor), která má za cíl oddělit elektrody, chránit je proti zkratu a zároveň propouštět ionty elektrolytu. Po přiložení napětí se náboje rozloží na povrchu elektrod. Z toho vyplývá, že čím větší bude

povrch elektrod, tím větší bude jejich kapacita. Kapacita je také velmi ovlivněna použitými materiály, převážně materiálem pórovité vodivé látky na povrchu elektrod. V posledních letech se jako velmi kvalitním materiálem jeví porézní forma grafenu [10].

Superkapacitory jsou používány především v oblastech slaboproudé elektrotechniky (zálohovací baterie PC, GPS, fotoaparátu,...). Uvažuje se o jejich využití v automobilovém průmyslu v kombinaci s bateriovými akumulátory, kde by se uplatnila jejich schopnost dodat velký výkon a proud v krátkém čase. Dalšími podstatnými výhodami je jejich vysoká účinnost (84 – 97 %), oproti bateriím jsou vyrobeny z netoxických materiálů a mají velký rozsah pracovních teplot (-40 až +70 °C) [1]. Pro použití akumulace v distribučních sítích jim brání především tyto vlastnosti: vysoké procento denního samovybití (5-40 %), pokles kapacity s každým cyklem nabití/vybití, s tím spojená životnost a vysoká cena (6 000 \$/kWh) a dále pak malá hustota energie (až 10x menší oproti běžným bateriím) [10].

Superkapacitory v současné době pro použití v elektrické síti nemohou konkurovat bateriím, jelikož při stejných rozměrech superkapacitory pojmu mnohem méně energie. Avšak jejich vývoj není zdaleka ukončen a s příchodem nových materiálů je možné, že v budoucnu dokáží ještě mnohé nabídnout.

- **Supravodivé cívky (SMES)**

Zkratka SMES pochází z anglického „superconductive magnetic energy storage“ a jedná se o systém, jehož součástí jsou tyto komponenty: supravodivá cívka, stabilizátor napětí, řídicí jednotka a kryogenní jednotka. Cívka je uložena v nádobě, která je vyplněna nejčastěji heliem a je zde udržována teplota -260 °C [13]. Díky této teplotě může proud procházet s minimálními ztrátami. Po nabití cívky se vytvoří magnetické pole, které se v cívce udržuje a v případě potřeby může být energie tohoto pole opět využita.

Supravodivé cívky charakterizuje vysoká objemová hustota energie (více než 4 000 W/L), rychlá reakční doba (milisekundy), rychlost plného vybití (méně než minuta), vysoká životnost (až 30 let), vysoká účinnost (95-98 %), ta je snížena pouze stabilizátorem napětí (střídač, usměrňovač) [1]. Jejich nevýhodou pro použití je vysoká míra samovybití během dne (10-15 %), vliv magnetického pole na okolí a vysoká teplotní závislost. Cena systému se odvíjí od místa použití, velkou roli zde totiž hraje rychlost plného vybití. Pokud je například požadována dodávka energie za 8-16 sec, cena se pohybuje okolo 2 000 \$/kW [12].

V současné době je využití supravodivých cívek stále velmi drahé, jedná se však o zatím nejefektivnější způsob akumulace. V některých případech také můžeme ocenit jejich rychlost

dodávky energie. Současný vývoj se zaměřuje na nové supravodivé materiály a snížení ceny. Stále se však bude jednat o zařízení vyžadující velmi přísné bezpečnostní podmínky díky nízkým teplotám a silnému magnetickému poli.

- **Akumulační železnice (ARES)**

Firma ARES North America vyvinula systém, který je založený na primitivním principu a tím je lokomotiva poháněná gravitační silou. „Advanced rail energy storage“ (ARES) se skládá z kolejnice, na které jezdí lokomotiva spolu s vagóny a řídicího operačního centra. Kolejnice je umístěná v místě určitého výškového rozdílu. V době přebytku poté elektromotor pohání lokomotivu vzhůru po kolejnici a v případě nedostatku energie je lokomotiva spolu s potřebným počtem vagónů spuštěna dolů. V tu chvíli motor pracuje v generatorickém režimu a energie je dodávána do sítě. Výhodou systému je, že všechny použité technologie jsou již léty prověřené a běžně využívané například v automobilovém průmyslu.

ARES dokáže uchovávat energii ve velkém rozsahu a o vysokých výkonech od 10 MW až po 2-3 GW. Oproti přečerpávacím elektrárnám jsou náklady na výstavbu daleko menší. Účinnost systému se udává 80 % (cyklus nabití/vybití). Výhodou také je, že ARES neprodukuje žádné emise a nepotřebuje ke své funkci žádný zdroj vody [14]. Umístění tohoto systému vyžaduje vhodný terén s odpovídajícím a dlouhým převýšením. Ideálně se umísťuje v blízkosti obnovitelných zdrojů, aby mohl lépe využívat jejich nesymetrické výroby. Hlučnost a estetický dopad na krajinu patří mezi negativní vlastnosti akumulací železnice.

V současné době se buduje první velký projekt tohoto typu v americkém státě Nevada. Výkon by měl mít 50 MW a kapacitu 12,5 MWh [14]. ARES je ukázkou, že není třeba nových technologií, ale i ze stávajících ověřených principů se dá sestavit efektivní způsob ukládání energie. Ovšem na ověření jeho parametrů bude třeba počkat až do roku 2019 [11], kdy by měl být ARES v Nevadě uveden do provozu.

- **Akumulátorová baterie**

Jde o zařízení, kde se působením chemických reakcí vytváří elektrická energie. Základní principy elektrochemické baterie jsou známy již z počátku 19. století, kdy Alessandro Volta dal vzniknout prvnímu elektrochemickému článku. Od té doby se baterie neustále vyvíjejí, mění se jejich složení a zdokonalují se tak jejich parametry, které představím v dalších kapitolách.

Základní princip spočívá v elektrochemickém článku, který je složen ze dvou elektrod, iontově vodivým elektrolytem a nádoby, ve které jsou zmíněné komponenty umístěny.

Elektrody jsou vyrobeny z takového materiálu, aby na jedné z nich probíhala oxidace (anoda) a na druhé redukce (katoda). Mezi elektrodami je elektrolyt, který je vzájemně odděluje a zároveň umožňuje ukládání náboje na elektrodách.

Základní druhy elektrochemických článků jsou primární (nabíjecí články), sekundární (akumulátory) a palivové. V této práci mě budou zajímat články sekundární, neboť ty mají možnost opětovného nabíjení a vybíjení. Jednotlivé druhy a principy baterií vysvětlím v následujících kapitolách.

1.2 Přínosy použití baterií

Využití a přínosy baterií se odvíjí od místa jejich aplikace. Uvedu zde obecně několik výhod, které jejich používání přináší.

Točivá rezerva: jde o rezervu u generátorů, která je schopná kompenzovat jejich výrobu při neplánovaném výpadku nebo v případě potřeby zvýšit výstupní výkon generátorů. Lze ji rozdělit do tří kategorií [17]:

- **Okamžitá rezerva:** slouží k pokrytí počátečního přechodného zatížení a udržení tak frekvence sítě. Musí reagovat do 5-10 sekund. Lze je využít u generátorů, které jsou částečně zatíženy a nedodávají tak svůj plný výkon. V této situaci je možné zvýšit točivý moment turbíny a navýšit tak výkon generátoru. Požadavky na takový přístroj mohou být dodání výkonu až 50 MW po dobu delší než 15 min.
- **Provozní rezerva:** je již připojena k síti, nicméně je nezatížená nebo neběží. Musí být schopná zareagovat do 10 minut a poté fungovat až 4 hodiny. Zde se často využívají generátory v pohotovostním režimu.
- **Plánovaná rezerva:** musí vydržet několik hodin kompenzovat výkon odstávky generátoru. Zde se nejčastěji využívá spojení více diesellových generátorů se společným výkonem přes 1 GW.

Všechny tyto rezervy mohou být realizovány pomocí baterií.

Regulace napětí: stabilita napětí je jedním z prioritních parametrů elektrických sítí. Mezi problémy stability patří například: poklesy napětí (v důsledku nadměrného zatížení sítě), přepětí (náhlé odlehčení sítě), přechodné jevy (rychlé změny zatížení), vyšší harmonické napětí a proudy (způsobují výkonové měniče, frekvenční měniče,...) a flickr (kolísání napětí způsobené občasnou vysokou spotřebou například elektrických obloukových pecí a svařovací

techniky). Velikost napětí je ovlivněna především tokem jalového výkonu. Zde se opět otevírá cesta pro využití baterií.

Pro rychlou regulaci se mohou používat například kondenzátory připojené k síti pomocí tyristorových měničů. Jejich reakční čas je méně než 10 milisekund. Nevýhodou však zůstává omezená kapacita kondenzátorů, což omezuje jejich schopnost dodávat činný a jalový výkon. Připojení vhodného zařízení s vysokou hustotou energie, jakou je například elektrochemická baterie, paralelně ke kondenzátoru zvyšuje schopnost tohoto zařízení dodávat či absorbovat jalový a činný výkon. Tento systém zlepšuje například integraci větrných elektráren, především převedením jejich nepravidelného a kolísavého výkonu na konstantní výkon.

Systém využívající tyristorový měnič, kondenzátor a baterii může být také velmi výhodný pro kompenzaci účinníku. Pokud je nasazen blízko zatížení, může sloužit pro dodání jalového výkonu v místě spotřeby a současně s tím omezit ztráty na vedení. Zároveň tak přispívá k zlepšení stability napětí.

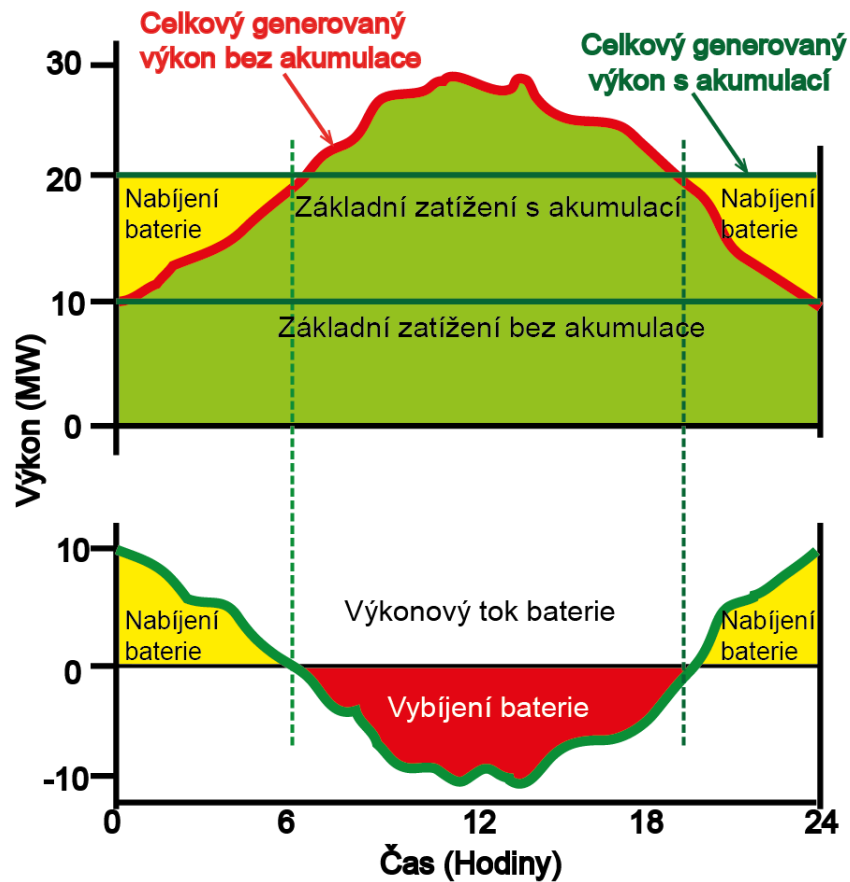
Zálohování energie: v přenosové i distribuční soustavě je zapotřebí pološpičkových a špičkových elektráren, které dokáží rychle reagovat na změnu zatížení sítě. I zde by baterie mohly najít využití jako alternativní zdroj energie. Nicméně v současnosti baterie výkonově a cenově nemohou těmto velkým elektrárnám konkurovat. Proto nachází využití spíše pro pokrytí menších výkyvů napětí blíže k místům spotřeby.

Řízení zatížení ve špičkách: krátkodobé špičkové zatížení může být velmi dobře kompenzováno pomocí bateriových systémů. Ty mohou zapůsobit daleko rychleji než přečerpávací elektrárny.

Zásadní výhodou baterií oproti generátorům je, že dokáží energii absorbovat. To znamená, že v jakékoliv denní době, kdy výroba převyšuje spotřebu, baterie mohou energii akumulovat, a tím se značně zlepšuje flexibilita sítě. Zde je velmi podstatné, kde je bateriové úložiště umístěno.

Příklad řízeného zatížení během dne je vidět z diagramu denního zatížení viz *Obr. 1.1*. V horním grafu je znázorněno červenou čarou zatížení během dne a zelenými přímkami posun základního zatížení bez akumulace na zatížení s akumulací. Žluté plochy vyznačují energii, která je ukládána do baterií. Dolní graf ukazuje výkonový tok v baterii v závislosti na denním zatížení. Je zřejmé, jak v průběhu dne dochází k nabíjení a vybíjení baterie a s tím spojené zvýšení základního pásma pro nasazování elektráren, které pak mohou pracovat na plný výkon a zvýšit tím svoji ekonomickou výhodnost.

Řízení zatížení s pomocí akumulace



Obr. 1.1: Diagram denního zatížení s využitím akumulace [17]

Regulace frekvence: změna zatížení sítě způsobuje změny frekvence v síti. S rostoucím odebíraným činným výkonem klesá frekvence sítě. Udržení síťové frekvence v povolených mezích je důležité pro udržení stability sítě. Při skokové změně zatížení sítě je potřeba rychle reagujícího členu, který dokáže na změny zatížení reagovat. Baterie mají rychlost a mohou pro síť sloužit buď jako zátěž, nebo jako zdroj energie. Baterie tedy mohou poskytnout především velmi rychlou reakci na změnu zatížení (cca 0,01 sekundy) a zároveň mají i potenciál pro vysoké skladovací kapacity. Mohou zajistit dodávky energie i v rozmezí několika hodin, nebo případně do doby než se spustí například přečerpávací elektrárny.

Start ze tmy (Black start): jedná se o poskytnutí akumulované energie nezávisle na elektrizační soustavě. Energie může být využita na rozběh velkých generátorů a s tím spojené znovuoobnovení dodávky elektřiny.

Integrace obnovitelných zdrojů: napětí generované solárními a větrnými elektrárnami je ovlivněno dle aktuálních klimatických podmínek, z toho důvodu je jejich dodávka energie

značně nestabilní a neustále se měnící. Elektrizací soustavě tak vznikají velké problémy s řízením napětí. Při využití těchto elektráren v kombinaci s akumulací by se těmto problémům dalo zamezit.

Energie z obnovitelných zdrojů by byla akumulována do bateriové stanice a z této stanice by energie při stabilizovaných a konstantních parametrech dále pokračovala do sítě. Operátor by také mohl mít možnost tuto energii využít za příznivých podmínek na trhu (vysoká poptávka = vysoká cena elektřiny).

Ekonomika: skladování energie umožňuje částečně oddělit výrobu od spotřeby energie. Ekonomika provozu vychází z řízeného zatížení sítě. Snahou je vyrovnat denní diagram zatížení tak, aby výroba pokrývala spotřebu a nebylo tak třeba zapojovat nákladné regulační prostředky, neboť by se mohl využít plný potenciál generátorů v základním pásmu.

Jedním z prostředků je řízení zatížení při špičkách. Při vysoké poptávce po energii může být využita skladovaná elektřina pro pokrytí denních maximálních zatížení a v období nízké poptávky po energii mohou systémy akumulace nahrazovat zatížení a energii akumulovat do sebe. Výsledkem je pak zvýšené vytížení elektráren, snížení nákladů na výrobu, zvýšení návratnosti velkých elektráren a možnost snížení poplatků za vyrobenou kilowatthodinu.

Za pomoci akumulace si své špičkové zatížení mohou také řídit někteří velkoodběratelé. Distributoři soustav si mohou vytvořit systém, který bude motivovat velké spotřebitele k řízení jejich spotřeby a v případě využití akumulačních systémů mohou svoji uloženou energii využívat pro vlastní užitek nebo za zvýhodněných podmínek vracet zpět do sítě.

Dalším ekonomickým využitím je tzv. energetická arbitráž (energy arbitrage). Energie je akumulována v období nízké poptávky, to znamená nízké ceny elektřiny, a v období vysoké poptávky je využita a prodávána za vyšší ceny. Operátor tak má možnost cenově reagovat na rychle se měnící zatížení soustav a využívat potenciálu skladované elektřiny.

Akumulace také přináší možnost odložit, zmenšit nebo zcela se vyhnout rekonstrukci sítí, kde špičkové zatížení již přesahuje dimenzovanou kapacitu vedení a vznikají tak výrazné tepelné ztráty [16]. Systém akumulace zde pomůže odlehčit síti při denních maximech zatížení a tím přinese i možnost dalšího zvýšení využití sítě.

1.3 Umístění akumulátorových baterií v elektrizační soustavě

Využití baterií se výrazně liší podle jejich umístění v elektrizační soustavě. Možnosti jejich umístění je možné rozdělit do čtyř bodů:

- **Výroba:** především velké jaderné a uhelné elektrárny, které jsou nasazovány v základním pásmu a mají největší podíl na vyrobené energii.
- **Přenosová soustava:** nejvyšší hodnoty napětí, na které je možné akumulaci provozovat. V České republice je tato soustava charakterizována hladinami 220 a 400 kV.
- **Distribuční soustava:** jedná se o sítě od 0,4 do 110 kV. Zahrnuje distribuční sítě, rozvodny, komerční / průmyslové zákazníky připojené přímo do této soustavy.
- **Místo spotřeby:** nejbližší u spotřeby elektrické energie. Do této skupiny patří úložiště umístěné v obytných domech, poblíž průmyslových nebo komerčních objektů (patří sem také elektromobilita).

U generátorů vytvářejících elektrické napětí sítě se mohou baterie uplatit jako točivé rezervy. Dalším využitím na úrovni výroby může být start ze tmy, kdy baterie pracují nezávisle na síti a v případě potřeby dokáží poskytnout energii, například pro opětovné roztočení generátoru.

V přenosové soustavě mohou baterie sloužit dispečerům jako velké rezervní zdroje nebo může být akumulace výhodná při vysoké poptávce po energii. Je zde možné regulovat napětí či frekvenci pomocí systémů s akumulací. Z ekonomických důvodů lze za pomoci akumulace odložit či zcela zamezit rekonstrukci sítě.

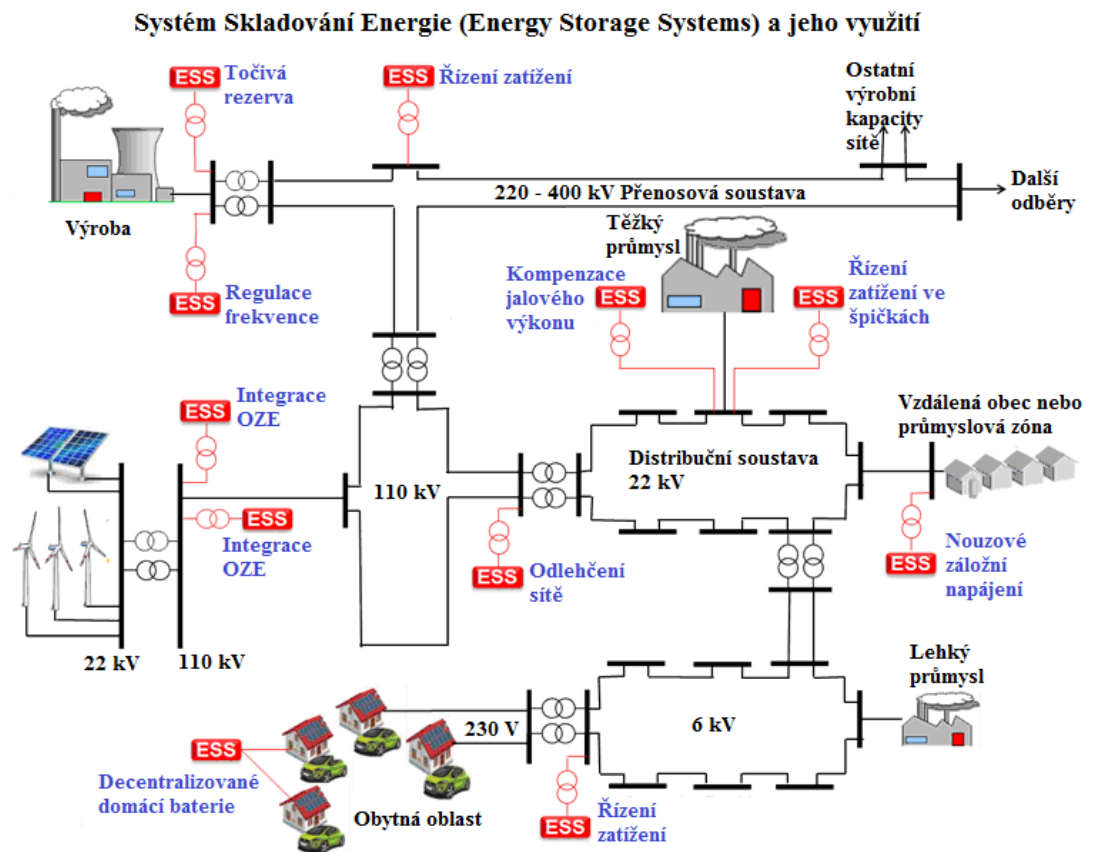
V distribuční soustavě jsou některé možnosti využití akumulace stejné jako v přenosové soustavě, jako například regulace napětí, zálohování energie, regulace frekvence a odložení investic do rekonstrukce sítě. Nicméně potenciál využití je zde výrazně jiný. Je to dáno tím, že soustava je blíže spotřebě a tudíž je možné rychleji reagovat a regulovat tak elektrizační síť. Zároveň zde není potřeba takových výkonů a tedy i investiční náklady jsou menší. U solárních či větrných elektráren je zde výhodná stabilizace jejich výroby pomocí akumulace. Výraznější význam má zde především řízení zatížení ve špičkách, kdy mají bateriové stanice schopnost napájet špičkové odběry a naopak odebírat energii v době přebytku nebo nízké poptávky.

V místě spotřeby nachází akumulace využití pro částečnou decentralizaci energetiky a pokrytí spotřeby z vlastních energetických zdrojů. Zároveň může být pro distribuční soustavu odlehčením především při denních odběrových maximech.

Baterie tedy mohou být využity ve velmi širokém spektru. Nicméně jejich využití je velmi

závislé na charakteru elektrizační soustavy, včetně stáří a konfigurace přenosové a distribuční soustavy, nákladů na akumulační stanice, regulačního omezení, struktury sazeb a diagramu zatížení.

Na Obr. 1.2 je příklad aplikace akumulace energie v různých místech elektrizační soustavy.



Obr. 1.2: Příklad aplikace skladování energie v elektrizační soustavě [17]

2 Akumulátory

V této kapitole uvedu jednotlivé parametry, které charakterizují vlastnosti sekundárních článků. Dále pak představím základní typy akumulátorů, které jsou v současnosti využívány, a provedu jejich vzájemné porovnání s ohledem na uvedené parametry.

2.1 Parametry akumulátorů

2.1.1 Kapacita

Zřejmě nejrozšířenější údaj baterie je kapacita. Udává množství elektrického náboje, který dokáže baterie přenést při jmenovitém napětí. Jednotky jsou ampérhodiny (Ah), ovšem z praktičtějších důvodů se používají spíše miliampérhodiny (mAh). Při kapacitě baterie 2 000 mAh je teoreticky dodávaný proud 2 ampéry po dobu jedné hodiny. Takto ovšem nelze uvažovat, je totiž potřeba znát napětí, ke kterému je kapacita vztažena a to bývá většinou napětí článků. Zásadní je také účinnost baterie, která není konstantní, ale odvíjí se od odebíraného proudu a stáří baterie. Dále má vliv závislost kapacity na teplotě prostředí. Udávaná kapacita je měřena při pokojové teplotě (20 °C).

Údaj o kapacitě udávaný v ampérhodinách tedy není příliš vypovídajícím o vlastnostech baterie. Pro přibližný výpočet kapacity je možné použít tento vztah:

$$C_{fikt} = C \cdot \frac{U_{článku}}{U_{zař}} \cdot \eta_{bat} \text{ (Ah)} \quad (2-1)$$

C je kapacita udávaná výrobcem, $U_{článku}$ značí typové napětí článku dané materiálovým složením jednotlivých prvků článku, $U_{zař}$ je celkové napájecí napětí potřebné pro koncové zařízení a účinnost baterie η_{bat} je popsána dále v textu.

2.1.2 Hustota energie

Hustota energie může být vyjádřena dvěma způsoby. Buď s ohledem na to, kolik energie je obsaženo v jednom kilogramu (Wh/kg), v některých zdrojích označována jako specifická hustota energie, anebo poměrem uložené energie na jeden litr (Wh/l), označována jako objemová hustota energie.

Tento parametr vypovídá o váhovém a prostorovém rozložení akumulátoru.

2.1.3 Měrný výkon

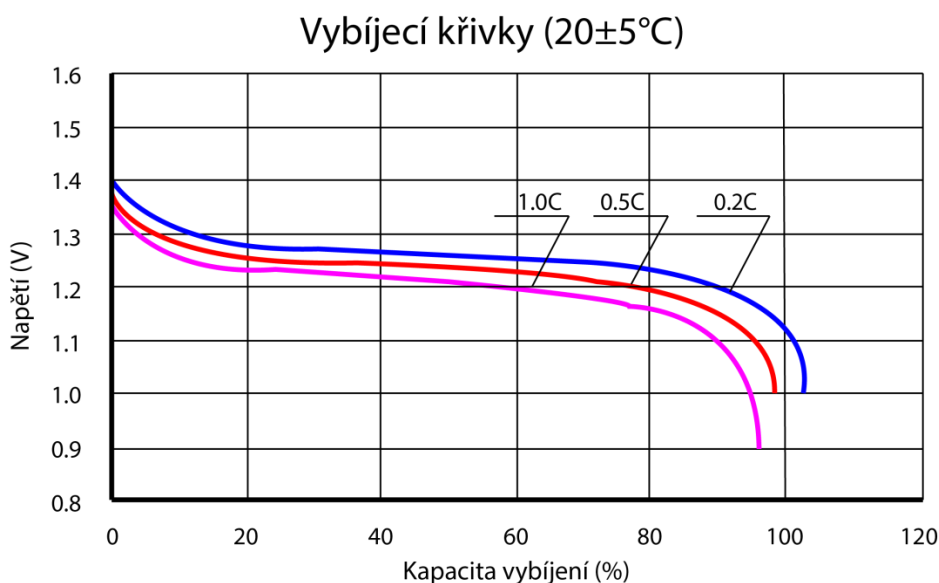
Je vyjádřením výkonu akumulátoru vztaženého na jeden kilogram (W/kg). Měrný výkon je dán chemickým složením baterie a jejím uspořádáním. Vyhodnocuje se jako podíl množství energie vzniklé při vybíjení baterie konstantním proudem a časem tohoto vybíjení.

Zatímco energie vyjadřuje množství práce, výkon značí rychlost, jakou se práce provádí. Měrný výkon je tedy vyjádřením, jak rychle lze získat přístup k energii. Baterie s nízkou hustotou energie mohou mít vysoký měrný výkon, pak jsou tyto baterie schopny v krátkém čase vydat své množství energie.

2.1.4 Napětí

Základním parametrem je jmenovité napětí. To udává napětí jednoho článku z daného chemického složení. Články mohou být sériově řazeny a poté je celkové napětí baterie označováno jako skutečné napětí. Tento parametr se měří na svorkách baterie a jeho velikost se mění v průběhu použití baterie v závislosti na stavu vybití, teplotě, velikosti a směru protékajícího proudu a mnoha dalších faktorech. Dále se měří napětí naprázdno při nezatíženém akumulátoru, vybíjecí proud je při tomto měření nulový.

Závislost mezi napětím a množstvím náboje dodaného v průběhu nabíjení vyjadřuje tzv. nabíjecí křivka a naopak průběh napětí při vybíjení zobrazuje tzv. vybíjecí křivka *Obr. 2.1*. Některé typy akumulátorů mají určené limity napětí, které nesmějí překročit, neboť by mohlo dojít k trvalému poškození baterie. Tyto hodnoty se označují jako maximální nabíjecí napětí a minimální vybíjecí napětí.



Obr. 2.1: Vybíjecí charakteristika pro NiMH akumulátor 10103 [18]

Z grafu *Obr. 2.1* lze vidět závislost napětí článku NiMH na jeho kapacitě vyjádřené v procentech. Symboly 1.0C, 0.5C, 0.2C značí velikost vybíjecího proudu v závislosti na čase. Tato baterie má kapacitu 10 000 mAh, křivka 1.0C tedy vybijí baterii proudem 10 000 mA za jednu hodinu. Jmenovité napětí je 1,2 V, což odpovídá stavu pro 1.0C, kdy je akumulátor na 60 % vybitý. Výhodou je, že si akumulátor dokáže v rozmezí od 10 % do 80 % vybití udržet přibližně stálou hodnotu napětí. Dále je možné odečíst velikost nabíjecího napětí 1,4 V a vybíjecího napětí 1,0 V.

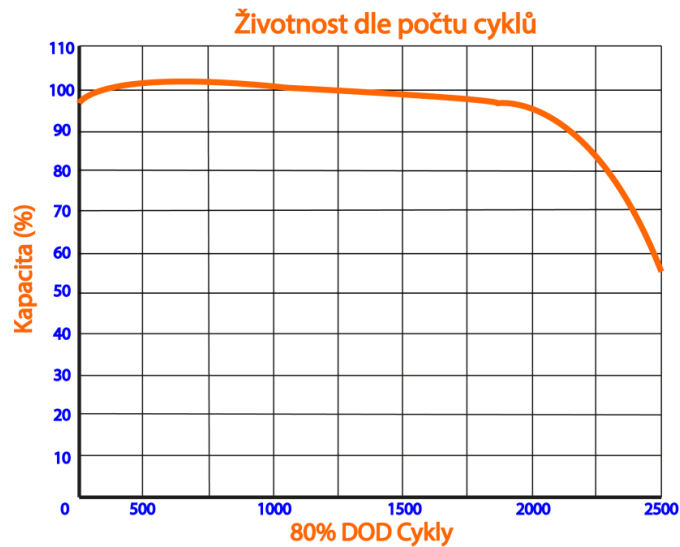
2.1.5 Energetická účinnost

Udává poměr mezi energií odebranou z akumulátoru během vybíjení a energií dodanou během nabíjení. Je dána elektrochemickou účinností daného akumulátoru. Přesněji se určuje pomocí *napětové účinnosti*, ta je dána poměrem mezi průměrným vybíjecím napětím ($U_{Vybijecí}$) a průměrným nabíjecím napětím ($U_{Nabijecí}$) a dále podle *Faradayovy účinnosti*, která je definována jako poměr celkového vybitého náboje ($Q_{Vybijecí}$) k celkovému nabitému náboji ($Q_{Nabijecí}$) po celou dobu nabíjecího cyklu. Výsledný vztah pak má tvar:

$$\eta_{BAT} = \frac{U_{Vybijecí}}{U_{Nabijecí}} \cdot \frac{Q_{Vybijecí}}{Q_{Nabijecí}} [\%] \quad (2-2)$$

2.1.6 Životnost

Nejčastěji se udává životnost s ohledem na počet nabíjecích/vybíjecích cyklů a ta je definována jako počet cyklů do doby, než kapacita klesne pod 80 % své jmenovité kapacity. Součástí tohoto údaje by také měl být parametr DOD (Depth of Discharge = hloubka vybití), ten udává procentuálně vybití baterie. Čím je DOD vyšší, tzn. baterie je více vybita, tím kratší je životnost. Velký vliv má také provozní teplota, obvykle bývají články zkoušeny při teplotě 25 °C.

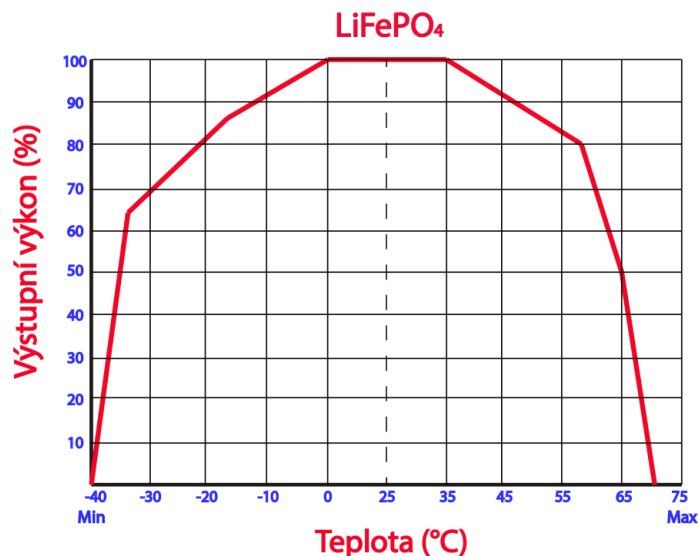


Obr. 2.2: Závislost kapacity na počtu vybíjecích cyklů při 80% DOD baterie LiFePO_4 [19]

Na grafu, viz Obr. 2.2, je ukázán typický průběh životnosti baterie při vybíjení do 80 % kapacity. Lze odečíst počet cyklů, kdy kapacita dosáhne 80 % své jmenovité hodnoty, tato hodnota je zhruba 2 300 cyklů.

2.1.7 Rozsah pracovních teplot

Jak jsem již zmínil u předchozích parametrů, teplota má výrazný vliv na chemické procesy probíhající v baterii. Výrobci uvádějí provozní teploty, při kterých jednotlivé parametry měřili a taktéž teploty a vlhkost ovzduší vhodné pro skladování baterií. Při návrhu akumulátoru je tedy nezbytné počítat s teplotou okolí a případně i s výtopným či chladícím zařízením. Příklad závislosti výkonu baterie na teplotě je ukázán na grafu viz Obr. 2.3.



Obr. 2.3: Vliv výkonu na teplotě baterie LiFePO_4 [20]

2.1.8 Samovybíjení

Baterie se i bez zapojení spotřebiče vybíjí. Množství vybité energie závisí na typu baterie a jejím chemickém složení. Důležitý je také aktuální stav baterie, zejména její stáří spojené s velikostí vnitřního odporu, počtem nabíjecích/vybíjecích cyklů, teplotou článků a počátečním stavem nabití. Se zvyšujícím se opotřebením a teplotou zároveň také stoupá hodnota samovybíjení. Charakteristika bývá většinou asymptotická, na začátku při plném nabití se baterie vybíjí rychleji a postupným vybíjením rychlost klesá. Výrobci většinou udávají hodnotu samovybíjení v %/měsíc.

2.1.9 Rychlost nabíjení

Rychlost nabíjení udává maximální velikost nabíjecího proudu. Nabíjení baterie má vliv na dobu životnosti. V katalogových listech mohou být uvedeny tyto údaje: pomalé, rychlé, ultrarychlé nabíjení. U těchto parametrů jsou uvedeny násobky jmenovitého proudu např. 10C. Hodnoty větší než 1C nabijí akumulátor za méně než hodinu. Tato informace může být užitečná při dimenzování akumulátoru k velmi častému využití.

2.1.10 Velikost vybíjecího proudu

Udává se velikost maximálního spojitého vybíjecího proudu a špičkový vybíjecí proud. Maximální spojitý proud je hranicí, kdy by proud neměl způsobit poškození ani degradaci baterie. Špičkový vybíjecí proud dosahuje ještě větší hodnoty než proud spojitý, je však omezen jen na velmi krátkou dobu. Hodnoty proudů se opět udávají pomocí násobku C.

2.2 Typy sekundárních článků

Chemické složení a uspořádání v sekundárním článku tvoří všechny parametry baterie. V současné době je na vývoj stávajících technologií a zkoumání nových materiálů kladen velký důraz a vědecké týmy se předhánějí, kdo vymyslí sekundární článek o lepších vlastnostech. Ideálně by takový článek měl mít co největší měrný výkon a hustotu energie, dlouhou životnost, co nejnižší cenu, měl by být ekologicky nezávadný a spoustu dalších vlastností.

V této části uvedu doposud známé, ale i relativně nové technologie využívané pro konstrukci baterií.

2.2.1 Lithium (Li)

Lithium je velmi lehký kov, dokonce tak lehký, že plave na vodě. Má velký elektrochemický

potenciál, který z něj dělá jeden z nejvíce reaktivních kovů. Tyto vlastnosti dávají lithiu potenciál dosáhnout velmi vysoké hustoty energie a výkonu. Proto je také v současnosti nejvíce zkoumaným a využívaným materiálem, především pro účely velkých výkonů jako je například automobilový nebo energetický průmysl.

Bylo a neustále je vyvíjeno mnoho variací s použitím lithia. Důvody pro vznik tolika variant jsou v zásadě dva. Prvním je, že se výrobci snaží najít nejvhodnější sloučeniny pro dosažení těch nejlepších parametrů využitelných v jejich aplikacích. Dalším důvodem jsou patenty, které chrání vynalezené složení sekundárních článků. Tyto patenty jsou platné několik let a po tuto dobu nesmí nikdo bez souhlasu vlastníka patentu danou technologii využívat. To nutí společnosti k vývoji svých vlastních technologií. Zřejmě nejznámější jsou Li-ion (Lithium-iontové) a Li-pol (Lithium-polymer) články. Byly vyvinuty pro překonání bezpečnostních problémů spojených s vysokou reaktivitou kovu. Výkony jsou závislé na vlastnostech a struktuře aktivních materiálů elektrod a elektrolytů. Především složení elektrolytu je klíčové pro zlepšení vlastností. Zde se nejvíce experimentuje a zkoušejí se různé varianty jako například: LiCoO_2 , LiFePO_4 , $\text{Li}(\text{NiMnCO})\text{O}_2$, LiNiO_2 , a mnoho dalších [20]. V zásadě je snaha dosáhnout co nejlepších parametrů a bezpečnosti pro aplikaci, v které mají být baterie využívány.

Mezi hlavní výhody lithiových článků patří vysoká hustota energie, napětí článku, které bývá okolo 3,6 V, nemají paměťový efekt, jsou ekologicky nezávadné a mají vysokou účinnost. Dále se mohou vybíjet mnohonásobně vyšším proudem, než je jejich jmenovitý proud. Jejich samovybití je velmi malé. Někteří výrobci udávají možnost vybití až na 90 % a jejich životnost v počtu cyklů nabití/vybití dosahuje hodnot kolem 3 000.

Jejich nedostatkem je vysoká cena, která má ovšem v dnešní době klesající tendenci. Dále také vysoká reaktivita lithia, díky které se například v reakci s vodou mohou vznítit. Aby nedocházelo k podvybití a přebíjení přes určitou mez napětí, je potřeba, aby baterie měla ochranný obvod. Ten může zároveň také hlídat teploty článků, neboť na teplotní změny jsou náchylné. Takový obvod poté zvyšuje cenu baterie. Některé studie tvrdí, že na Zemi není dostatek této suroviny, abychom byli schopni využívat pouze lithiové baterie. Je tedy otázkou, jak moc se k tomuto kovu upnout.

2.2.2 Olovo (Pb)

Olovo patří mezi nejdéle a nejvíce používané akumulátory. Největší využití nacházejí v automobilovém průmyslu. Je mnoho druhů olověných baterií, jako například: startovací,

staniční, trakční, řízené ventilem (VRLA), gelové nebo dimenzované pro hloubkové vybití. Právě poslední zmíněné se jeví jako varianta pro použití k fotovoltaickému systému.

Olovené akumulátory jsou již dávno odzkoušenou technologií a tak nelze očekávat, že jejich vývoj v budoucnu přinese nějaké rapidní změny. Mezi výhody nepochybně patří pořizovací cena, která je spojená s dobrou dostupností olova. Jsou spolehlivé, jmenovité napětí mají kolem 2 V a při použití dobrého typu baterie, například ventilové gelové dimenzované pro hluboké vybití, může její účinnost dosahovat kolem 90 %.

Zásadní nevýhodou je nízká hustota energie, tzn. vysoká hmotnost. Nejsou vhodné pro rychlé nabíjení a oproti lithiovým bateriím mají nižší životnost nabíjecích/vybíjecích cyklů.

2.2.3 Nikl-kadmium (Ni-Cd)

Tento typ článku se začal používat v polovině 20. století, a to v železniční dopravě. Mezi jeho výhody patří vysoká spolehlivost, možnost odběru velmi vysokých proudů, velký rozsah pracovních teplot, malý vnitřní odpor, možnost velmi rychlého nabití a výborná mechanická odolnost.

Naopak jeho využití je rapidně limitováno použitím kadmia, které je klasifikováno jako látka škodlivá životnímu prostředí a z toho důvodu se smějí NiCd baterie používat pouze pro průmyslové účely, nikoliv pro komerční. Další nevýhodou je tzv. paměťový efekt. Ten vzniká, pokud se článek opakovaně vybíjí na stále stejnou hodnotu a má za následek náhlý pokles napětí. Oproti lithiovým článkům mají menší hustotu energie. V cenovém porovnání s oloveným článkem o stejné kapacitě vycházejí NiCd články 3-4krát dražší.

2.2.4 Nikl-metal-hydrid (NiMH)

Tyto články byly vyvinuty jako ekologická náhrada za NiCd články. Rozdíl oproti NiCd je v tom, že NiMH články dosahují lepších kapacit při stejných rozměrech. Dále mají vysokou životnost a jsou ekologicky nezávadné. Dokáží si udržet relativně stále výstupní napětí při vybíjení.

Jejich nevýhodou jsou vyšší hodnoty samovybíjení a jmenovité napětí cca 1,2 V. Z toho vyplývá, že oproti lithiovým bateriím pro dosažení stejného výkonu je zapotřebí více článků. Jsou také velmi náchylné na nízké teploty.

Tyto baterie se používaly například v elektromobilu Toyota Prius. Dnes jsou již nahrazeny lithiovými bateriemi.

2.2.5 Průtokové

Tyto baterie jsou atypické svojí konstrukcí. Skládají se ze dvou nádrží, kde v jedné je negativní a v druhé pozitivní elektrolyt. Pomocí čerpadel proudí elektrolyt skrz chemický článek, kde jsou elektrolyty odděleny membránou a vytváří zde elektrické napětí, viz *Obr. 2.4*.

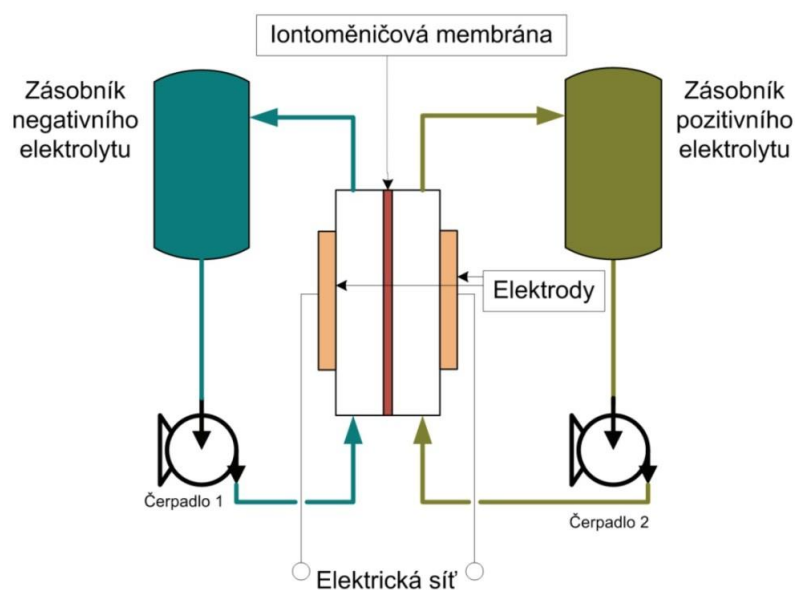
Velkou výhodou tohoto systému je, že poskytuje téměř neomezenou elektrickou kapacitu. Omezením je pouze velikost nádrží na elektrolyt.

Znamé typy průtokových baterií jsou:

- VRB – Vanad redoxní baterie (Vanadium Redox Battery),
- ZnBr – Zinko-bromový akumulátor (Zinc-Bromide Battery),
- PSB – Polysulfidová bromová baterie (Polysulfide-Bromide Battery).

Vanad redoxní baterie by mohla najít své využití u OZE, neboť výrobci deklarují její téměř neomezenou životnost nabíjecích/vybíjecích cyklů. Při degradaci elektrolytu nebo membrány lze tyto části vyměnit a baterii tak používat dál. Vanad je plně recyklovatelný. Mohou se zcela vybijet, nejsou omezeny minimálním napětím. Jmenovité napětí článku je v rozmezí 1,4 - 1,6 V. Jsou vhodné pro použití od 100 kW do 10 MW.

Nevýhodou je menší účinnost cca kolem 80 % a hlavně malá specifická i objemová hustota energie, díky čemuž baterie vyžadují hodně prostoru. Velké rozměry a hmotnost baterie jsou dány především obsahem elektrolytu, s tím jsou také spojeny problémy při transportu.



Obr. 2.4: Konstrukce průtokové baterie [21]

2.2.6 Ostatní

Existuje nepřeberné množství složení a principů baterií, které jsou v současnosti na trhu, a výčet všech by vydal na samostatnou knihu. Představím zde ještě tři typy baterií, které mají potenciál využití u OZE.

Sodíkové baterie: jsou známy dva druhy těchto baterií a to Sodium-sulfur (NaS) „Sodíkovo-sírová“ a Sodium-nickel-chloride „Sodíkovo-niklová“. Tyto baterie se vyznačují obrovskými provozními teplotami od 270 °C do 350 °C. S tím je spojená ochranná nádoba, která musí být dokonale izolována a chráněna proti vytečení sodíku, který je hořlavý. Výhodou těchto baterií je možná vysoká hustota energie 150 - 760 Wh/kg, životnost 15 let a počet cyklů více než 4 200 při 80 % DOD [22].

Značnou nevýhodou je pořizovací cena, spojená s nároky na bezpečnost nádoby článku.

Kov-vzduchová baterie: anglický název baterie je metal-air battery. Tento typ článku používá kovy jako například hliník, zinek, hořčík i lithium, které následně s kyslíkem slouží k výrobě elektrické energie. Konstrukční výhodou těchto baterií je, že potřebují pouze jednu kovovou elektrodu na článek, další elektrodu tvoří kyslík získávaný ze vzduchu. Tyto baterie nejsou nijak toxické a použité kovy jsou snadno recyklovatelné. Dosahují vysoké hustoty energie, až 3krát vyšší než lithiové. Použité materiály se odrážejí na investiční ceně, která je v porovnání s konkurencí velmi nízká.

Vývoj těchto baterií je ve velmi rané fázi a je potřeba vyřešit několik problémů spojených s nízkou účinností těchto článků. Dalším problémem je citlivost na změny podmínek okolního vzduchu, především vlhkost a obsah nečistot. Baterie také vyžadují poměrně častou údržbu na výměnu kovové elektrody.

Hliníková baterie: tato baterie byla představena poměrně nedávno vědeckým týmem ze Standfordské univerzity. Její hlavní přednosti by měly být rychlost nabíjení, velký počet cyklů, nízká cena a bezpečnost. Anoda je tvořena hliníkem a katoda speciálně upraveným grafitem, oba tyto kovy jsou snadno k dostání. Nevýhodou je prozatím nízká hustota energie [23].

2.3 Porovnání jednotlivých typů

Uvedené typy a parametry sekundárních článků nyní vzájemně porovnam, viz *Příloha A: Porovnání parametrů sekundárních článků*. Uvažovány jsou především takové technologie, které jsou vhodné pro použití v energetice. To znamená články, které jsou schopné absorbovat

dostatečné množství energie a zároveň jejich cena je s ohledem na počet cyklů přijatelná.

Všechny parametry uvedené v tabulce umístěné v příloze A jsou pouze informativní a slouží pro přibližný odhad vhodné technologie. Ve skutečnosti je zapotřebí uvažovat mnohem více parametrů a zároveň se zaměřovat na parametry konkrétního výrobce, neboť každý výrobce zmíněnou technologii vyrábí s jinými parametry. Záleží na účelu instalace baterie, například pokud bude jejím cílem reagovat na skokové změny zatížení a tím tak pomáhat regulovat frekvenci, bude muset být dostatečně rychlá, což znamená požadavek na vysoký měrný výkon. Parametry baterií se mění rozložením a rozměrovými vlastnostmi anody, katody, elektrolytu a případně membrány mezi ně vložené. Na materiály se mohou používat také různá aditiva, která mají vliv na konečné vlastnosti daného článku.

Baterie spolu s fotovoltaickou elektrárnou mohou sloužit k různým účelům, v mé práci využiji baterii pro lepší integraci elektrárny do distribuční sítě. Bude zde regulovat a vyhlazovat vyrobenou energii, a tím pomůže ke zlepšení stability sítě. Zároveň přebytečná energie může být využita pro ekonomický zisk, kdy při vysoké poptávce po energii a zároveň tak i vysoké výkupní ceně může být energie z baterie prodána. Pro tyto účely je potřeba především rychlá reakční doba na mnoho krátkých nabíjecích/vybíjecích cyklů a dostatečná kapacita pro skokové změny výroby.

Vyhodnocením tabulky zjišťuji, že nejlepších hodnot hustoty energie dosahují články NaS, LiCoO₂ a NMC, což znamená, že při použití těchto prvků bude prostorové a váhové rozložení baterie nejnižší v porovnání s ostatními. V případě využití akumulátoru u fotovoltaické elektrárny nepředpokládám velké nároky investora na prostorové rozložení. Bateriová stanice může zabírat více místa. Měrný výkon se zjišťuje velmi obtížně, neboť většina výrobců tento údaj neuvádí. Nicméně z mého pohledu dosahuje největších výkonů olověná a NiMH baterie, to znamená, že jsou schopny v krátkém čase dodat své množství energie. Avšak množství jejich energie nedosahuje takových hodnot. Mnohem lépe se tedy jeví lithiové články, které poskytují kompromis mezi dostatečnou hustotou energie a měrným výkonem.

Počet cyklů je velmi důležitý údaj. Spolu s životností baterie informuje objektivněji o ceně baterie za vyrobenou kWh. Nejlepších hodnot dosahují průtokové baterie, které mohou být zároveň většinou využívány v celém rozsahu jejich kapacity. Z hlediska pořizovací ceny jsou ale dražší. Zároveň vyžadují více prostoru a jejich výstavba a zapojení tak bude také nákladnější oproti konkurenci.

Lithiové baterie dosahují nejlepších účinností, mají nejnižší hodnoty samovybití a mohou

být zatěžovány výrazně vyšším proudem, než je jejich jmenovitý proud. Z mého porovnání tedy vycházejí jako nejuniverzálnější řešení, konkrétně články LiFePO₄ a NMC se jeví jako velmi vhodné pro využití v energetice.

Dle výzkumu společnosti DNV GL z roku 2016 pro americkou společnost Pacificorp viz *Tab. 1*, je možné vyčíst využití jednotlivých technologií v energetickém průmyslu. Články LiFePO₄ jsou nejvyužívanější pro dosažení vysokých výkonů, kdežto NaS jsou nejvhodnější pro akumulaci velkého množství energie. Tento výzkum ukazuje, že průtočné baterie jsou vhodné pro velké projekty, kde je potřeba akumulovat vysoké hodnoty energie. Lithiové baterie nachází využití především u středně velkých a malých projektů, kde je zejména požadavek na rychlost a dodávaný výkon.

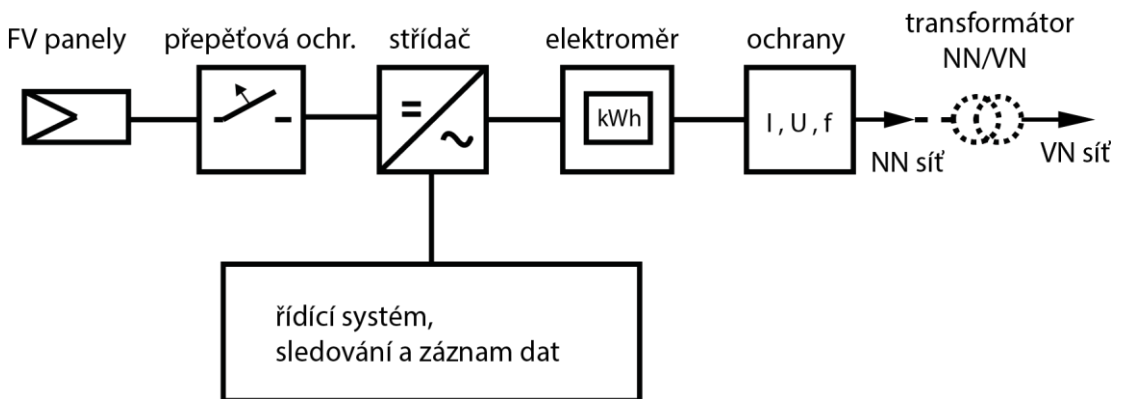
Tab. 1: Porovnání využití elektrochemických akumulátorů v realizovaných projektech [24]

Vlastnosti systému	NMC	LiFePO ₄	NaS	VRB	ZnBr
Průměrná velikost (kW)	6500	5000	6000	4000	1000
Průměrná velikost (kWh)	15 000	3100	40 000	14 000	2000
Největší instalovaný projekt (kW)	30 000	31 500	50 000	15 000	1000
Největší instalovaný projekt (kWh)	60 000	12 000	300 000	60 000	2000
Momentální instalovaný výkon (MW)	77	142	186	66	5
Momentální množství instalované energie (MWh)	30	220	1254	226	25

3 Fotovoltaická elektrárna bez akumulace energie

V současné době je takto provozována většina FVE v České republice připojených do distribuční sítě VN i NN. Elektrárny slouží buď pro pokrytí spotřeby v místě připojení, jako například domácí FV systémy, anebo jsou využity jako zdroje elektrické energie a jejich výkon je přímo dodáván do distribuční soustavy.

Nevýhodou těchto systémů je, že jejich výroba je přímo závislá na slunečních podmínkách. Z těchto zdrojů se tak stávají nečekané špičkové zdroje, které výrazně ovlivňují stabilitu a kvalitu elektrického napětí v elektrizační soustavě. Na *Obr. 3.1* je znázorněné schéma připojení FVE bez akumulace energie do distribuční sítě s použitím distribučního transformátoru.



Obr. 3.1: Připojení FVE k distribuční síti bez akumulace

3.1 Dopady připojení fotovoltaické elektrárny na elektrizační síť

Pro připojení výroby do distribuční sítě je nutné, aby byly splněny připojovací podmínky dané platnými normami. S těmito podmínkami je spjata studie připojitelnosti. Ta může být požadována provozovatelem dané elektrizační soustavy dle Vyhlášky č.16/2016 Sb., pokud provozovatel uzná, že připojovaný zdroj může mít vliv na stabilitu sítě. Obecně se hodnota mezního výkonu, který může ovlivnit chod sítě, pohybuje od 30 kW výše. Tato hodnota závisí na parametrech dané sítě.

Vlivy způsobené připojením nové výroby jsou tyto:

- zvýšené napětí,
- odchylky napětí,

- nesymetrie napětí,
- změna napětí při spínání,
- změny frekvence,
- přetoky činných a jalových proudů,
- flickr,
- emise harmonických proudů,
- ovlivnění zařízení HDO.

S ohledem na potenciální přínos akumulace zde rozvedu jen některé z uvedených vlivů.

3.1.1 Zvýšené napětí

Vlivem výroby OZE dochází ke zvýšení napětí v předávaném místě distribuční sítě. Pravidla pro provozování distribučních sítí [35] udávají maximální procentní násobek jmenovité hodnoty napětí, o který může výrobna zvýšit napětí v předávaném místě PDS. Tato hodnota se liší na hladině NN a VN:

$$\Delta u_{VN,110} \leq 2 \% \quad (3-1)$$

$$\Delta u_{NN} \leq 3 \% \quad (3-2)$$

Posouzení připojitelnosti z hlediska změny napětí probíhá v síti NN nezávisle na síti VN a naopak. Může tedy dojít k situaci, kdy v návaznosti těchto dvou přepětí dojde ke zvýšení až o 5 % U_n . Pro tyto případy je potřeba dbát na správně nastavené odbočky transformátorů s ohledem na možné dopady výroby a spotřeby.

3.1.2 Odchytky a nesymetrie napětí

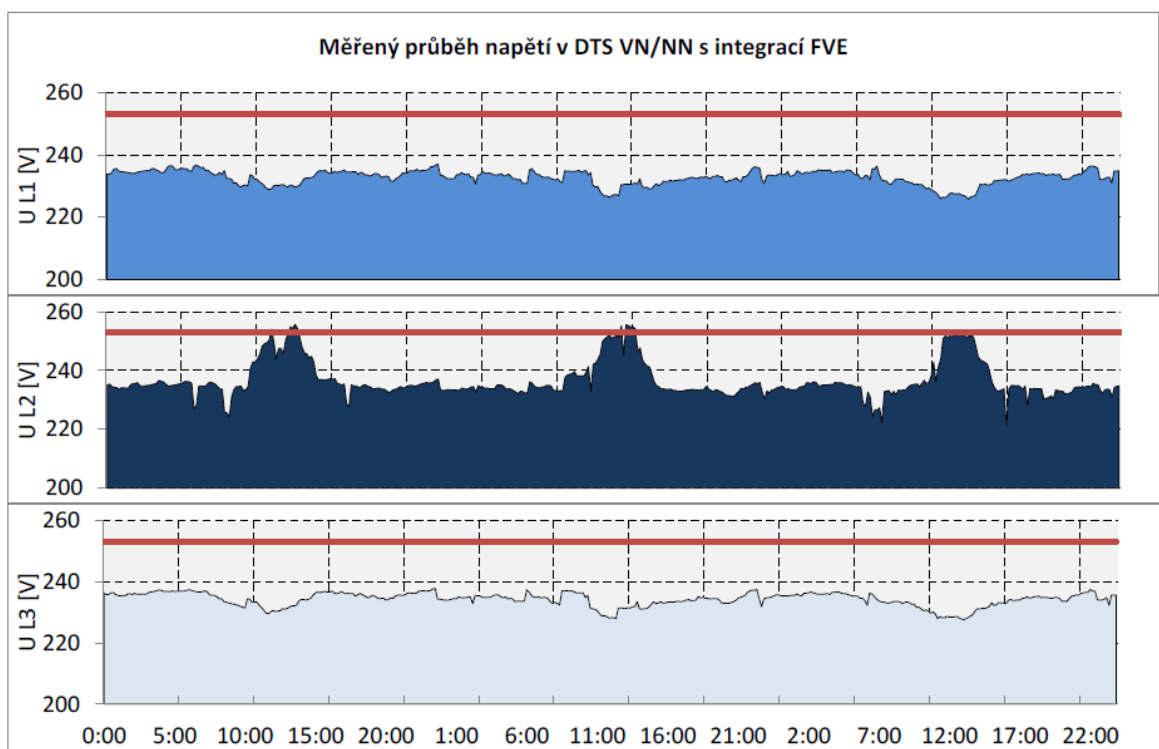
Kvalitu napětí řeší norma ČSN EN 50 160, která udává pro hladiny NN a VN dovolenou odchylku $\pm 10 \% U_n$. Odchytky se vyhodnocují minimálně týdenním měřením v měřícím intervalu 10 minut, kdy se z tohoto intervalu určuje jeho průměrná efektivní hodnota. Dalším parametrem normy je požadavek pro síť NN, aby 95 % naměřených hodnot během týdne bylo v rozmezí $\pm 10 \% U_n$ a zároveň 100 % hodnot bylo v rozmezí $+10/-15 \% U_n$. Pro hladinu VN jsou podmínky stejné s rozdílem, že 100 % naměřených hodnot musí být v rozsahu $\pm 15 \% U_n$.

Nesymetrie napětí se vyhodnocuje v třífázové síti, kdy dochází k různé velikosti efektivních hodnot sdružených napětí anebo fázové úhly mezi sdruženými napětími nejsou stejné. Charakteristickým ukazatelem nesymetrie je tzv. stupeň nesymetrie napětí:

$$u_2 = \frac{U_{(2)}}{U_{(1)}} \cdot 100 \leq 2 \% \quad (3-3)$$

$U_{(2)}$ značí zpětnou složku napájecího napětí a $U_{(1)}$ souslednou složku napětí, jejich poměr nesmí být větší než 2 %.

Podle měření provedeného společností EGC [36] v DTS na hladinách VN/NN, která napájela vývody NN s připojenými jednofázovými i trojfázovými fotovoltaickými elektrárnami, lze vyhodnotit překročení mezí napětí +10 % U_n během odpoledních hodin, kdy FVE vyrábí nejvíce elektrické energie, viz *Obr. 3.2*. Rovněž z naměřených průběhů byl vypočítán stupeň napěťové nesymetrie překračující limitní mez 2 %.



Obr. 3.2: Záznam z měření na DTS [36]

3.1.3 Změny frekvence

Frekvence je systémový parametr, to znamená, že by měl být v celé propojené soustavě stejný. Parametrem, který velikost frekvence ovlivňuje, je činný výkon. Soustava je řízena tak, aby se aktuálně vyrobená elektrická energie rovnala energii spotřebované, poté je frekvence neměnná. Avšak spotřeba energie a výroba OZE je nepredikovatelná, není tedy

možné dosáhnout absolutní bilanční rovnováhy mezi vyrobeným a spotřebovaným činným výkonem. K účelu vyrovnání této bilance slouží primární a sekundární regulace, kterou disponuje každá elektrizační soustava.

Většina FVE instalovaných před rokem 2010 má nastavené své frekvenční ochrany v rozsahu 49,5 Hz – 50,2 Hz, to znamená, že při překročení těchto hranic frekvence dojde k odstavení elektrárny vlivem zapůsobení ochran. Při větší koncentraci takovýchto zdrojů dojde k náhlému poklesu dodávaného činného výkonu a kritická situace soustavy je tak ještě prohloubena. Při posuzování stability sítě je potřeba uvažovat s předčasným odpojením těchto zdrojů. Z těchto důvodů jsou v současné době kladeny vyšší nároky na nastavování frekvenčních ochran elektráren. Provozní rozsah frekvence se rozšířil a je doporučeno využívat postupné odpínání výkonu, to zajišťuje lépe vybavený střídač.

3.1.4 Přetoky činných a jalových výkonů

Náhlé přetoky elektrické energie jsou často způsobeny změnami ve výrobě nebo spotřebě energie a z hlediska řízení kvalitativních parametrů, jakými jsou frekvence a napětí, je důležité tyto přetoky sledovat a snažit se je omezit. Snahou je, aby v předávaných místech v uzlech soustavy nebyl dodáván činný a jalový výkon zpět do nadřazené soustavy, zároveň účinník odebíraného činného i jalového výkonu nesmí být nižší než 0,95. Tyto podmínky plynou z kodexu přenosové soustavy.

Pokud nejsou tyto podmínky dodrženy, dochází k přetokům jalového a činného výkonu do nadřazené soustavy. Tím je vedení více namáháno, vznikají tepelné ztráty a to má za následek rychlejší opotřebení vedení a zároveň ekonomické náklady.

Typicky se dodávka jalového výkonu děje při malém odebíraném činném výkonu, kdy je odběr menší než přirozený výkon vedení. Dalším zdrojem je fotovoltaická elektrárna, která produkuje jalový výkon díky svému kompenzačnímu zařízení a zároveň díky interní elektroinstalaci elektrárny, která obsahuje velké množství kabelových rozvodů. Ke zvýšené výrobě jalového výkonu dochází při západu slunce, neboť kompenzační zařízení stále pracuje.

Činný výkon proudí do vyšších napěťových soustav především v poledních hodinách, kdy FVE dosahují nejvyšší výroby, nicméně spotřeba je v tuto dobu většinou nízká.

Pro připojení zdroje do elektrizační soustavy musí být dodržen účinník podle požadavků provozovatele soustavy. Běžné požadavky provozovatelů distribučních soustav na účinník jsou v rozmezí 0,95 induktivní a 0,95 kapacitní. Při kapacitním účinníku je jalová energie dodávána

do sítě a při induktivním je ze sítě odebírána.

V případě nedodržení stanovených limitů účinníku je provozovateli výroby účtován poplatek za nevyžádanou dodávku nebo vysoký odběr jalového výkonu. Z těchto důvodů jsou výroby vybaveny systémem kompenzace jalového výkonu, ten může být realizován například pomocí kompenzačních baterií nebo může být vlastností střídače.

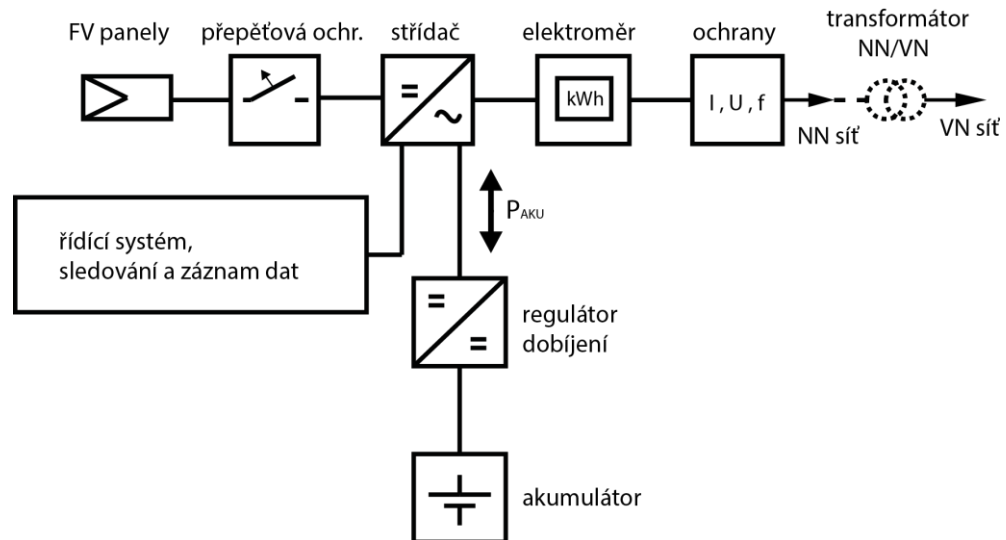
3.1.5 Flickr

Norma ČSN EN 50 160 ed.3 definuje flickr jako vjem nestálého zrakového vnímání vyvolaného světelným podnětem, jehož jas nebo spektrální rozložení kolísá v čase. Norma také zmiňuje, že kolísání napětí způsobuje změnu jasu svítidel, což může působit nepříjemně pro lidský zrak. Flickr vzniká následkem kolísání napětí, které je vyvolané rychlými změnami zatížení sítě. Na toto kolísání je náchylná spotřební elektronika, jako například televizor, počítač apod. Tyto změny způsobují mimo jiné také fotovoltaické elektrárny.

Pro posouzení úrovně flickru se využívají tyto parametry: míra vjemu krátkodobého flickru (P_{st}) a míra vjemu dlouhodobého flickru (P_{lt}). Jejich měření se provádí pomocí síťových PQ analyzátorů. Hodnota míry vjemu dlouhodobého flickru pro síť nesmí v 95 % času, v libovolném týdenním období, překročit $P_{lt} \leq 1$. Přesný postup výpočtu se různí podle charakteru hlavních zdrojů flickru, postupy výpočtů jsou uvedeny v normě PNE 333430-0. Zároveň je zde požadavek, aby jednotlivý zdroj připojený do sítě NN nebo VN nepřekročil hodnotu $P_{lt} < 0,46$.

4 Fotovoltaická elektrárna s akumulací energie

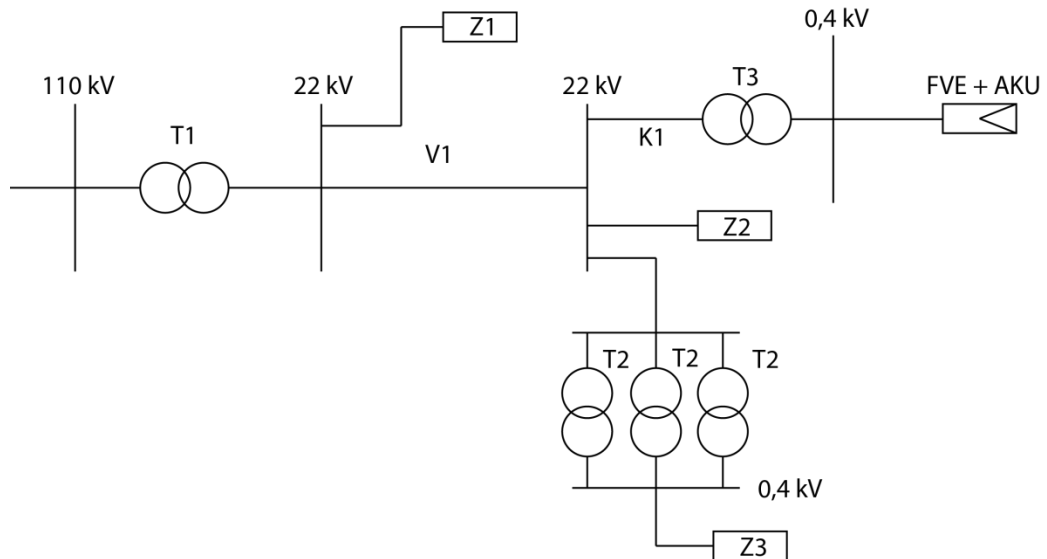
V předchozí kapitole jsem uvedl negativní dopady FVE na elektrizační síť. Nyní na modelovém příkladu předvedu, jak dokáže využití akumulace zlepšit parametry napětí dodávaného elektrárnou do sítě. Příklad připojení tohoto typu elektrárny je ukázán na *Obr. 4.1*. Další možností je připojit akumulátor k síti skrz svůj vlastní střídač.



Obr. 4.1: Připojení FVE k distribuční síti s akumulací

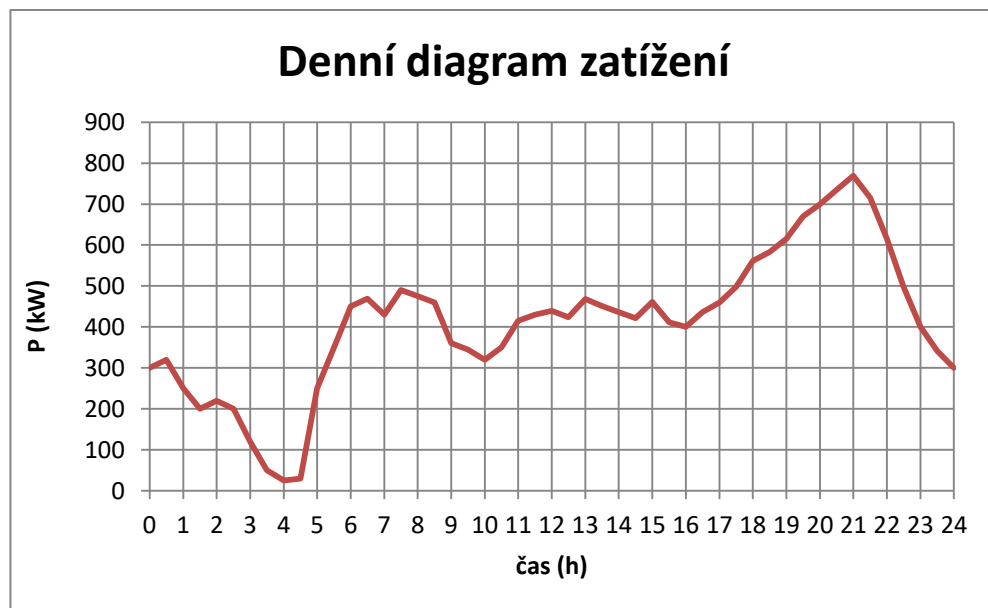
4.1 Modelový příklad distribuční sítě s FVE a akumulací

Schéma modelové sítě je vytvořené propojením soustav VN a NN. Do VN soustavy je připojená FVE elektrárna s akumulací, která má sloužit převážně pro pokrytí spotřeby v soustavě NN. Elektrárna má výkon 1 MVA a kapacitu akumulací baterie spočítám v další kapitole. Ve schématu se dále nachází zátěže označené písmeny Z a pořadovým číslem. Pro výpočty jsem si vytvořil modelový příklad sítě *Obr. 4.2*. K dispozici mám také diagram denního zatížení NN sítě a graf výroby fotovoltaické elektrárny při neproměnlivém slunečném počasí.



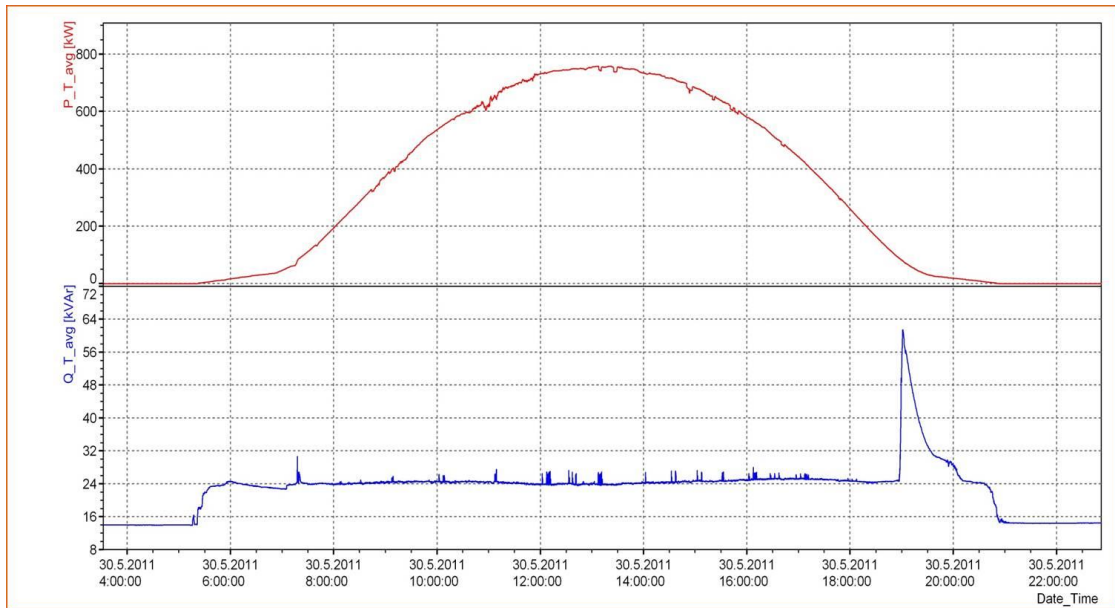
Obr. 4.2: Schéma modelové sítě

Pro oblast NN jsem vytvořil denní diagram zatížení, viz Obr. 4.3. Je zde simulováno typické zatížení vesnice v letním období, kdy dochází ke špičkovému odběru ve večerních hodinách. Zatížení dosahuje hodnot 750 kW.



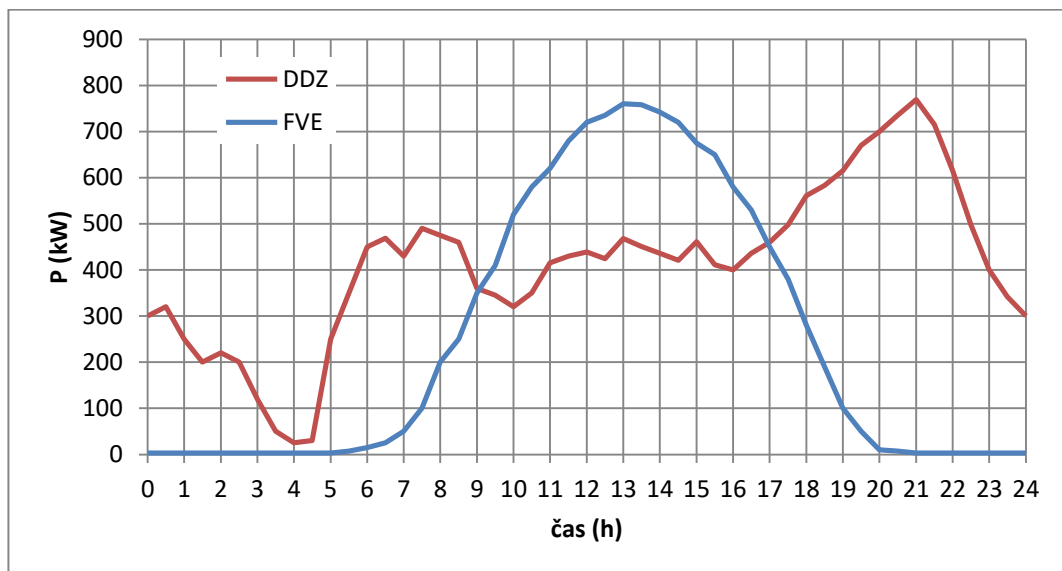
Obr. 4.3: Zatížení oblasti NN

Graf produkce činného a jalového výkonu FVE je změřen za slunečného dne bez oblačnosti. Takovéto dny jsou v průběhu roku na území České republiky spíše ojedinělé. Z grafu činného výkonu lze odečíst maximální dosažitelný výkon okolo 750 kW_p, kterého bylo dosaženo v čase 13:00. Průběh jalového výkonu je dán kompenzačním zařízením a vnitřními kabelovými rozvody, kterými je elektrárna vybavena. Špička jalového výkonu v čase 19:00 byla způsobena vlastností střídače, který ovládá mimo jiné také kompenzační zařízení.



Obr. 4.4: Výroba FVE při slunečném jasném počasí

Kombinací grafů zatížení a výroby viz Obr. 4.4, je patrné neefektivní využití elektrické energie generované elektrárnou, která dosahuje maximálních výkonů v poledních hodinách, kdežto spotřeba je typicky nejvyšší ve večerních hodinách. Generovaný výkon se tedy vrací do vyšších napěťových hladin a svým průchodem vytváří tepelné ztráty na vedení.



Obr. 4.5: Kombinace diagramu zatížení oblasti NN a výroby FVE

Toto jsou podklady, z kterých budu vycházet pro demonstraci využití akumulace společně s fotovoltaickou elektrárnou.

4.2 Účel akumulace u OZE

Pro návrh akumulátorového systému je potřeba nejdříve určit, jakým způsobem bude akumulace probíhat a jakých výsledků je potřeba dosáhnout. Využití je mnoho a vždy záleží na konkrétní situaci a stavu sítě. Význam může mít například pro zamezení přetoků činné a jalové energie, nebo pro pokrytí špiček zatížení, které mohou s nástupem elektromobilů dosahovat o mnoho vyšších hodnot než nyní. Provozovatel výroby může také například využívat akumulaci jako zdroj energie, kterou bude prodávat při vysoké poptávce, tudíž i vyšších cenách za vyrobenou kWh.

Jedním z cílů může být lepší integrace OZE do sítě. Integrací je myšleno zlepšení dodané elektrické energie od OZE tak, aby nepůsobila problémy elektrizační soustavě. Může jí být dosaženo různými způsoby a od toho se odvíjí potřebná kapacita akumulátoru. V mé práci jsem pro tuto možnost zvolil návrh akumulátoru, který bude schopný regulovat denní výrobu FVE na celodenní konstantní dodávaný výkon. V práci dále uvedu, jaké výhody tato varianta přináší.

Další cíle akumulace mohou být například přesunutí nevyužitelné vyrobené energie z poledních hodin do večerních hodin, tím dojde ke snížení zatížení. Tuto možnost v mé práci také demonstruji. Další možností, jak lépe integrovat OZE, je například využít akumulaci pouze na vyhlazení vyrobené energie.

Pro volbu akumulátorového systému je potřeba analyzovat zdroj energie, na který bude akumulátor reagovat. V této práci uvažuji fotovoltaickou elektrárnu, která je charakteristická velkou proměnlivostí výroby. Bude proto potřeba systému, který dokáže reagovat velmi rychle a je schopný dodávky velkého proudu. Systém se bude muset rychle nabíjet a vybíjet s co nejmenšími ztrátami.

Vzhledem k příkladu sítě obsažené v mé práci, kdy FVE slouží především pro dodávku výkonu do oblastí NN, jsem se rozhodl navrhnout kapacitu pro dodávku konstantního výkonu po celý den a kapacitu pro přesunutí výroby z poledních hodin do večerních.

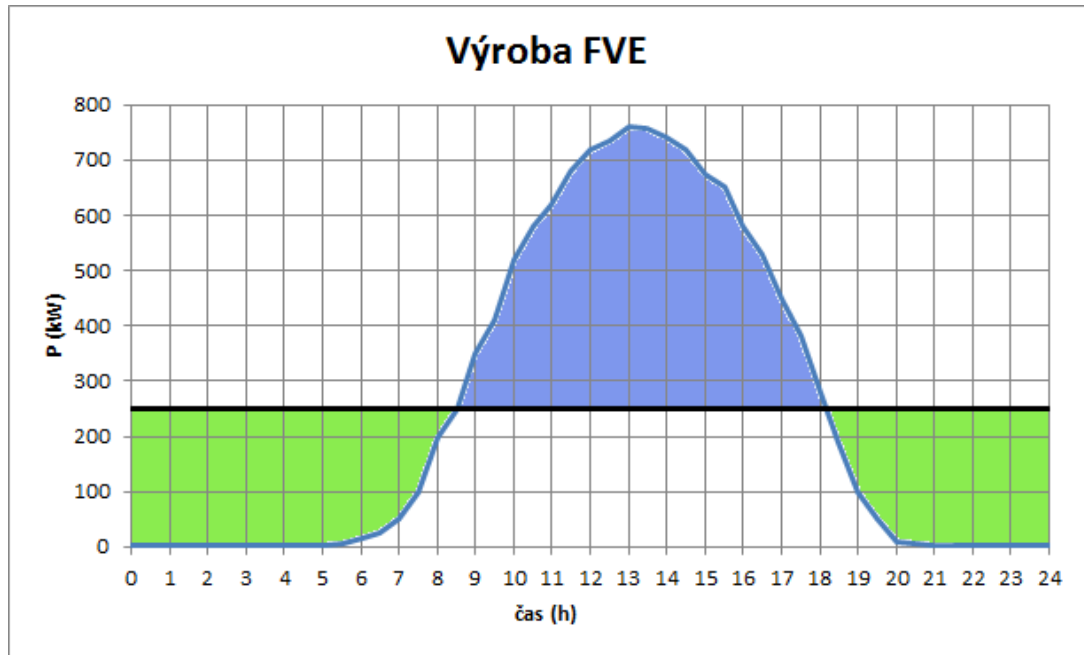
4.3 Výpočet potřebné kapacity baterie pro konstantní výkon

Tento konstantní výkon se bude lišit každým dnem, neboť je závislý na výrobě fotovoltaické elektrárny a ta je závislá na počasí. Vzhledem k dispečerskému řízení sítě bude každý den potřeba ohlásit dispečinku předpokládaný výkon pro následující den, který bude elektrárna dodávat do sítě.

Takovýto provoz vyžaduje poměrně přesnou znalost předpovědi počasí. Predikce výroby je možné dosáhnout například ze statistických dat pro místo instalace elektrárny. Takovýto údaj však nemá příliš vypovídající hodnotu a bývá velmi nepřesný. Zřejmě nepřesnější předpovědi je možné dosáhnout pomocí hydrometeorologického ústavu, který je schopný pomocí dat z radarů a družic určit předpověď na 36 hodin dopředu s úspěšností okolo 90 %. Vzhledem k citlivosti fotovoltaických panelů na oblačnost lze předpokládat spolehlivost predikce výroby kolem 80 %.

Elektrárna bude provozována pro denní akumulaci, to znamená, že kapacita akumulátoru bude schopna pojmout téměř všechnu vyrobenou elektrickou energii za den. Vzhledem k výše zmíněné predikci výroby je zřejmé, že pro denní akumulaci je potřeba mít v akumulátorech dostatečnou rezervu energie pro případy, kdy je předpověď nepřesná. Pro určení maximální akumulované energie, kterou je schopna elektrárna vygenerovat za den, je nutné uvažovat nejdelší slunečný den v roce. Takovéto dny jsou na našem území dosaženy v červnu. Tyto údaje je možné zjistit pomocí různých aplikací, které se zabývají dopadem slunečního záření na zemský povrch, jednou z takovýchto aplikací je například PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System). Pro můj výpočet postačí již změřený graf, viz *Obr. 4.4*, který byl naměřen za velmi slunečného dne 30. 5. 2011.

Pro určení maximální energie, kterou bude akumulátor schopný pojmout, je potřeba nejdříve určit plochu pod křivkou výkonu generovaného FVE, omezeného maximálním konstantním výkonem 250 kW, viz *Obr. 4.6* modrá plocha. Maximální konstantní výkon je zvolen s ohledem na poměr mezi akumulovaným výkonem a výkonem potřebným pro pokrytí části dne bez výroby FVE, tzn. mezi modrou a zelenou plochou. Celková vyrobená energie elektrárnou je 6 098 kWh. Aby tuto energii bylo možné využít po celý den, je potřeba ji vydělit dobou, po kterou má být používána, v mém případě tedy 24 hodin. Tím zjišťuji výkon, který je elektrárna schopna dodávat celý den (cca 250 kW). Tento graf jsem si pro lepší úpravu překreslil do programu Microsoft Excel. Plocha pod křivkou se spočítá pomocí integrace dané křivky v časovém rozmezí. Já jsem pro výpočet zvolil tzv. obdélníkovou metodu. Tato metoda je pro mé účely dostatečně přesná. Výsledná hodnota akumulované energie za den je rovna 3 195 kWh (modrá plocha) a energie potřebná pro dobývání (zelená plocha) je 3 095 kWh. V akumulátoru zbyde 100 kWh energie, nicméně při navrhování tohoto akumulátoru je výhodnější kapacitu spíše předdimenzovat než poddimenzovat.



Obr. 4.6: Výroba FVE s limitním výkonem 250 kW

Mimo parametry již uvedené je dále potřeba uvažovat hloubku vybití (DOD), stárnutí baterie a počet dní samostatného provozu (D). Stárnutí baterie je pro systémy podobné velikosti podle zdroje [37] stanoveno na 10 %, v následujícím vztahu je vyjádřeno konstantou 1,1. Hloubka vybití závisí na použité technologii a W_{bat} značí vypočítanou maximální hodnotu energie, kterou je třeba akumulovat. Výsledný vztah má tvar:

$$W_{ak} = \frac{1,1 \cdot W_{bat} \cdot D}{DOD} = \frac{1,1 \cdot 3095 \cdot 1}{0,8} = 4\,256 \text{ kWh} \quad (4-1)$$

Do vztahu jsou dosazeny hodnoty dle předešlých úvah. W_{bat} jsem spočítal integrací plochy, hodnota počtu dní pro samostatný provoz je určena na 1 den a hloubka vybití při použití LiFePO4 článků je 80 %.

Dále je nutné ke vztahu připočíst rezervu pro nepřesnou předpověď počasí, ta může být okolo 20 %. Zároveň tato rezerva zajistí nižší hloubku vybíjení akumulátoru, což má příznivý vliv na životnost.

$$W_{ak,celk} = W_{ak} + W_{bat} \cdot 0,2 = 4256 + 3095 \cdot 0,2 = 4\,875 \text{ kWh} \quad (4-2)$$

Tímto výpočtem získávám maximální elektrickou energii, která může být uložena v akumulátoru, a podle této hodnoty lze navrhnout parametry akumulátoru.

4.4 Optimalizace kapacity pro pokrytí zatížení

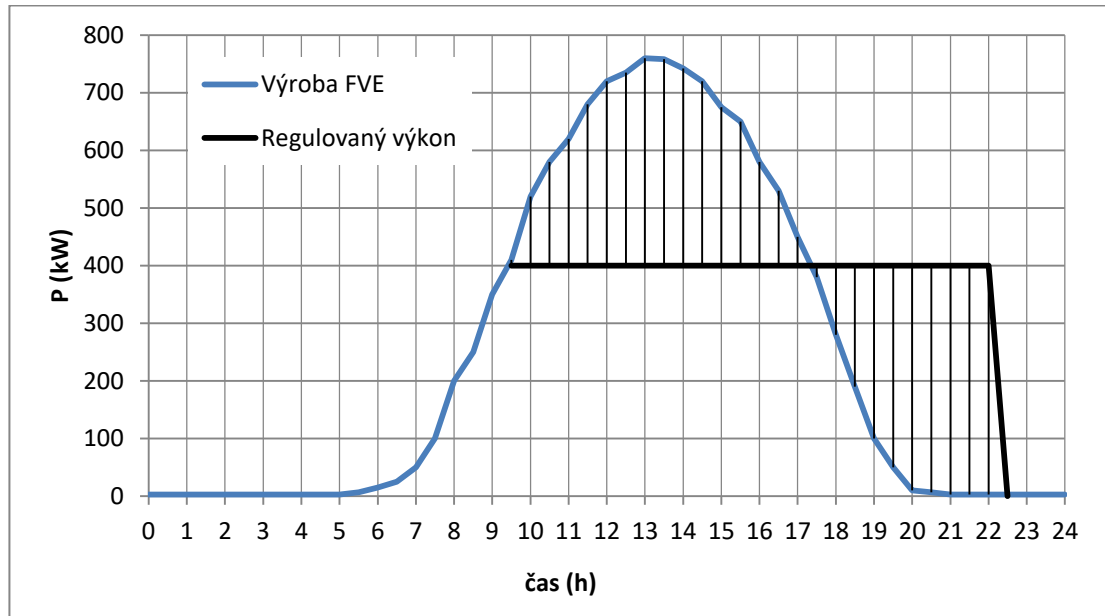
Dalším způsobem, jak dimenzovat kapacitu akumulátoru tak, aby nemusela dosahovat vysokých hodnot, s čímž jsou spojeny značné investiční náklady, je regulace jen na tu část dne, kdy FVE začíná vyrábět do doby, kdy je zvýšená spotřeba oblasti, případně do vyčerpání povolené kapacity akumulátoru. V praxi například pro letní období by byla kapacita ideálně využita od 8:00 do 22:00. Došlo by tak k omezení špičkového zatížení oblasti a k lepšímu využití vyrobené energie.

Tento druh provozu opět vyžaduje, aby vlastník elektrárny s jednodenním předstihem nahlásil dispečinku predikci výroby pro další den. Toto ohlášení by mohlo obsahovat začátek výroby, následně velikost ustáleného výkonu a konec dodávky. Všechny udávané parametry by měly být v tolerancích danými provozovatelem soustavy.

Pro stanovení maximální využitelné kapacity poslouží opět graf uvedený na *Obr. 4.4*, na kterém je zobrazena maximální vyrobitelná elektrická energie za den v roce. Lze také využít hodnot z programů pro predikci dopadajícího slunečního záření na fotovoltaické panely. Úkolem akumulátoru tedy bude vyrovnávat odchylky výroby FVE dané proměnlivým počasím a regulovat denní diagram dodávky. Maximální dodávaný výkon (P_{ref}) je 40 % z instalovaného výkonu elektrárny (P_N), který je v mém případě 1 MWp. Hodnotu 40 % jsem zvolil s ohledem na množství akumulované energie, to by mělo být dostatečné pro výkonové vyrovnání diagramu i za velmi proměnlivého počasí.

$$P_{ref} = 40\% \cdot P_N = 0,4 \cdot 1000 = 400 \text{ kW} \quad (4-3)$$

Následující graf zobrazuje využití naakumulované energie z doby vyššího generovaného výkonu než nastavených 400 kW v době snižující se dodávky výkonu od samotné elektrárny. Z grafu je patrné, že při využití akumulace je dodáván konstantní výkon od 9:30 do 22:00.



Obr. 4.7: Výkon dodávaný pomocí akumulace pro bezoblačný slunečný den

Integrací akumulované energie z denní špičky výroby zjistím potřebnou kapacitu akumulátoru. Tato plocha vychází na 1 265 kWh. Stejným výpočtem jako v předchozí podkapitole je potřeba tuto energii rozšířit s ohledem na hloubku vybití, stárnutí a nepřesné předpovědi počasí.

$$W_{bat,opt} = \frac{1,1 \cdot W_{bat}}{DOD} + W_{bat} \cdot 0,2 = \frac{1,1 \cdot 1265}{0,8} + 1265 \cdot 0,2 = 1\,993 \text{ kWh} \quad (4-4)$$

Kapacita akumulátoru pro dodání celodenního konstantního výkonu byla 4 875 kWh, v tomto případě je potřebná kapacita téměř 2,5krát nižší, tím se značně sníží investiční náklady.

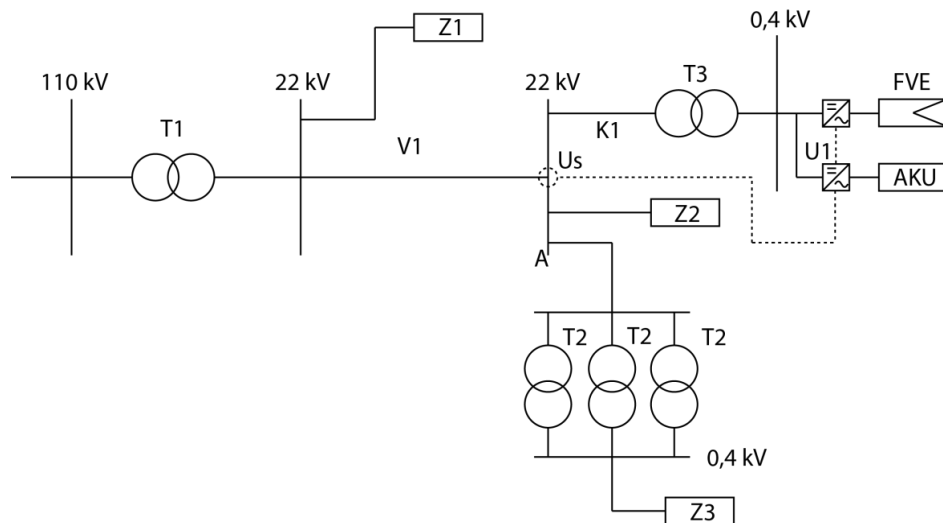
Nevýhodou tohoto návrhu je, že při poddimenzování kapacity nebo špatném odhadu výroby pro další den se již vyrobená energie nenaakumuluje a výrobní tak bude opět dodávat do sítě proměnlivý výkon. Je třeba tedy zvolit kapacitu takové velikosti, aby nedošlo k naplnění akumulátoru v době, kdy elektrárna produkuje vyšší výkon, než je nastavený limitní výkon pro daný den.

Další možností, jak zajistit dodávku výkonu pro další den, je nabíjet akumulátor přes noc levnější energií. K tomu by docházelo na základě predikce počasí pro další den a řídicí systém by poté rozhodl, zda nabíjet akumulátor v noci. Pokud tedy předpověď počasí bude vykazovat pro další den značnou oblačnost, akumulátor se na základě této předpovědi bude nabíjet přes noc. Další den tak bude dodávat vyšší výkon a levnější energii naakumulovanou přes noc opět prodá, ovšem již za vyšší cenu.

4.4.1 Omezení přetoků P a Q

Vlastnosti akumulátoru navrhnutého v předchozí kapitole jsem se rozhodl rozšířit o možnost eliminace přetoků z oblasti nízkého napětí a vlastní výroby FVE. Akumulátor tak bude muset reagovat na aktuální zatížení oblasti s ohledem na vyrobenou elektrickou energii od FVE a vyrovnávat toky činných a jalových výkonů takovým způsobem, aby byla splněná výkonová bilance. Jalové a činné toky by se tak nevracely zpět do sítě a nepůsobily by zde dodatečné ztráty a úbytky napětí.

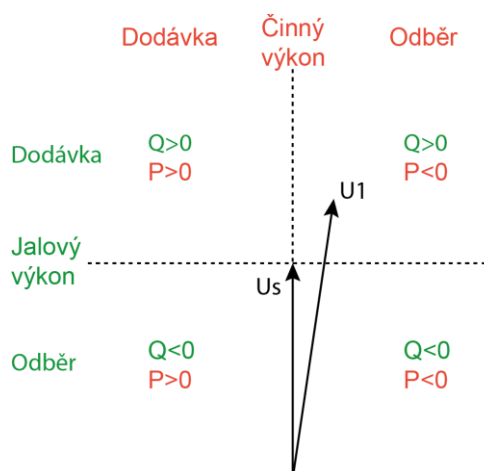
Součástí tohoto zapojení bude třeba, aby akumulátor pracoval skrze svůj vlastní speciálně vybavený střídač, který dokáže regulovat tok výkonů v širokém rozmezí kapacitního i induktivního účinníku. Spolupráce FVE a akumulátoru bude muset být zajištěna stejným způsobem jako v předchozím případě s tím rozdílem, že střídač akumulátoru bude muset měřit aktuální zatížení v oblasti a výrobu u FVE. Vyhodnocením těchto měření se bude rozhodovat, jak regulovat toky výkonů. Oba systémy budou připojeny do sítě přes stejný transformátor o jmenovitém výkonu 1 MVA. Střídače musejí tedy zajistit, aby se výkony obou zdrojů nesčítaly, ale aby akumulátor stále reagoval a upravoval výkon fotovoltaiky, viz předchozí kapitola. Výsledné schéma zapojení je znázorněno na *Obr. 4.8*.



Obr. 4.8: Zapojení akumulátoru pro omezení přetoků P a Q

Měření bude vyhodnocovat především velikost napětí a fázový úhel zátěže, pomocí těchto parametrů bude možné regulovat toky výkonů. Dodávka či odběr činného a jalového výkonu by měla probíhat nezávisle na sobě. Mohla by totiž nastat situace, kdy bude akumulátor vybitý a nebude tak schopný dodávky činného výkonu. Bude však potřeba, aby mohla stále probíhat regulace jalového výkonu, která nevyžaduje takové množství uskladněné energie

jako činný výkon. Funkci střídače popisuje *Obr. 4.9*.



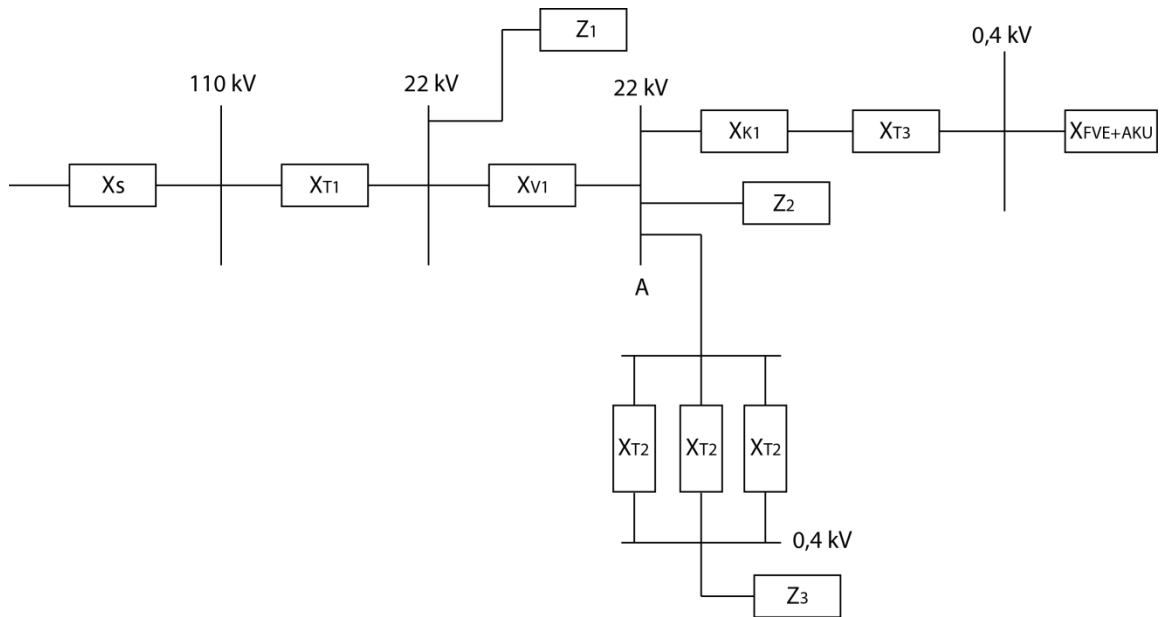
Obr. 4.9: Funkce střídače v závislosti na velikosti napětí a fázového posunu

Napětí sítě U_s je měřené v rozvodně označené písmenem A, napětí U_1 je generované střídačem u akumulátoru. Napětí sítě se mění podle charakteru zátěže. Pokud zátěž pracuje s kapacitním účinníkem, generuje tak jalový výkon, který zvyšuje napětí v soustavě. Naopak pokud má zátěž induktivní charakter, odebírá jalový výkon ze sítě a napětí se snižuje. Na tyto změny reaguje střídač, který v případě, kdy $U_1 < U_s$, působí jako absorber jalového výkonu ($Q < 0$), má tedy induktivní charakter. Pokud $U_1 > U_s$ (viz případ na *Obr. 4.9*), bude střídač působit jako generátor jalového výkonu ($Q > 0$), bude mít kapacitní charakter. Snahou střídače z hlediska řízení jalového výkonu je vyrovnat amplitudy napětí. Zároveň je možné řídit nezávisle na velikosti amplitudy směr toku činného výkonu podle fázového posunu napětí. Tyto střídače jsou často výrobci označovány například jako STATCOM/ESS. Firma ABB nabízí kompletně vybavený systém pro ukládání energie a řízení přetoků. Součástí této výbavy je právě takovýto typ střídače. Celý systém je produkován pod názvem SVC Light with Energy Storage [40].

4.5 Připojení FV elektrárny s akumulací k distribuční síti

Pro posouzení účinků akumulace jsem si vytvořil modelový příklad sítě, viz *Obr. 4.2*, na kterém demonstruji rozdíly mezi instalací samostatné FVE a využití elektrárny s akumulací. Na základě porovnání těchto rozdílů bude možné vyhodnotit přínosy akumulace.

Jak jsem již zmínil v kapitole 4.1, FVE v modelovém schématu sítě slouží převážně pro pokrytí spotřeby v síti NN. Pro výpočty jsem si vytvořil náhradní schéma a zadal potřebné parametry prvků.



Obr. 4.10: Náhradní schéma sítě NN a VN

Parametry transformátorů uvedené v Tab. 2 jsou zvoleny dle zdroje [38]:

Tab. 2: Parametry transformátorů

	Uprim (kV)	Usek (kV)	St (MVA)	Pk (kW)	uk (%)
T1	110	22	25	63	10
T2	22	0.4	0.4	6	4
T3	22	0.4	1	10	6

Pro zjednodušení neuvažují ve schématu Obr. 4.10 odstupňovaný průřez vedení, je zde pouze jedno vedení AIFe70 o celkové délce 9 kilometrů a dále pak přípojovací kabel pro elektrárnu AXEKCY120 o délce 50 metrů. Jednotlivé parametry vedení jsou uvedeny dle zdroje [39] v následující tabulce:

Tab. 3: Parametry vedení

	Typ	Rk (Ω/km)	Xk (Ω/km)	l (km)
V1	70 AIFe6	0.434	0.931	9
K1	120 AXEKCY	0.253	0.469	0.05

Parametry zátěže připojené do sítě NN skrz 3 transformátory jsou uvedeny v Tab. 4. Respektují vlastní spotřebu transformačních stanic a spotřebu oblasti nízkého napětí:

Tab. 4: Parametry zátěže

	U (kV)	cos ϕ	P (kW)	S (kVA)
Z1	0.4	0.95	780	821
Z2	22	0.95	100	105
Z3	22	0.95	500	526

Posledním prvkem schématu je FVE, provozovaná na hladině 0,4 kV s parametry zvolenými po konzultaci s konzultantem práce:

Tab. 5: Parametry FVE

	Un (kV)	Sn (MVA)	cos ϕ
FVE	0.4	1	1

4.5.1 Výpočet výchozích parametrů sítě

Pro zhodnocení schématu je nejprve nutné vypočítat hodnoty impedancí a reaktancí jednotlivých prvků potřebných pro výpočet. Hodnoty jsem přepočítával do místa připojení odbočky k FVE a síti NN, čili na hladinu 22 kV, ve schématu je toto místo označeno písmenem A. Výpočty jsou provedeny v programu Microsoft Excel, zde uvádím příklady výpočtu:

- Transformátor 1:

$$Z_{K,T1} = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_{NS}^2}{S_{N,T1}} = \frac{10}{100} \cdot \frac{(22 \cdot 10^3)^2}{25 \cdot 10^6} = 1,936 \Omega \quad (4-5)$$

$$R_{K,T1} = \Delta P_K \cdot \frac{U_{NS}^2}{S_{N,T1}^2} = 63 \cdot 10^3 \cdot \frac{(22 \cdot 10^3)^2}{(25 \cdot 10^6)^2} = 0,048 \Omega \quad (4-6)$$

$$X_{T1} = \sqrt{Z_{K,T1}^2 - R_{K,T1}^2} = \sqrt{1,936^2 - 0,178^2} = 1,935 \Omega \quad (4-7)$$

- Vedení 1:

$$R_{V1} = R_1 \cdot l = 0,434 \cdot 9 = 3,906 \Omega \quad (4-8)$$

$$X_{V1} = X_1 \cdot l = 0,931 \cdot 9 = 8,379 \Omega \quad (4-9)$$

4.5.2 Napět'ové poměry po připojení zdroje

Procentuální násobky jmenovitého napětí, o které nesmí zdroj připojený do elektrizační soustavy navýšit toto napětí, jsem uvedl v kapitole 3.1.1. V případě sítě VN je limitní hodnota 2 %. Pro posouzení dopadu FVE na navýšení napětí jsem využil výpočty úbytků napětí jednotlivých částí sítě. Tyto úbytky respektují jak ohmickou, tak i reaktanční složku impedance, a zároveň také úhel impedance sítě.

Vzhledem k tomu, že proud procházející jednotlivými částmi sítě je závislý na zatížení, rozdělil jsem si síť na úseky ohraničené místem odběru. Proud procházející první oblastí pak vychází:

$$I_1 = \frac{\Sigma P}{\sqrt{3} \cdot U_N \cdot \cos\varphi} = \frac{1380 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 22 \cdot 10^3 \cdot 0,95} = 38,12 \text{ A} \quad (4-10)$$

Kde ΣP značí součet všech připojených odběrů od místa prvního úseku.

Pro úbytek napětí v 1. úseku zanedbávám parametry napájecí sítě, neboť se jedná pouze o modelový příklad. Hlavní reaktanci v obvodu tvoří transformátor a vedení. Výpočet je následující:

$$\begin{aligned} \Delta U_1 &= R_{K,T1} \cdot I_1 \cdot \cos\varphi + X_{T1} \cdot I_1 \cdot \sin\varphi \\ &= 0,048 \cdot 38,12 \cdot 0,95 + 1,927 \cdot 38,12 \cdot 0,312 = 24,8 \text{ V} \end{aligned} \quad (4-11)$$

Stejným způsobem vypočítám úbytek na dalším úseku.

$$I_2 = \frac{\Sigma P}{\sqrt{3} \cdot U_N \cdot \cos\varphi} = \frac{1280 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 22 \cdot 10^3 \cdot 0,95} = 35,36 \text{ A} \quad (4-12)$$

$$\begin{aligned} \Delta U_2 &= R_{V1} \cdot I_2 \cdot \cos\varphi + X_{V1} \cdot I_2 \cdot \sin\varphi \\ &= 3,906 \cdot 35,36 \cdot 0,95 + 8,379 \cdot 35,36 \cdot 0,312 = 223,65 \text{ V} \end{aligned} \quad (4-13)$$

Úbytky sečtu a vyjádřím v procentuální hodnotě, dostanu tak úbytek v bodě A při neuvažování vlivu FVE.

$$\Delta u_{1\%} = \frac{\sqrt{3} \cdot (\Delta U_1 + \Delta U_2)}{U_N} \cdot 100 = \frac{\sqrt{3} \cdot (24,8 + 223,65)}{22\,000} \cdot 100 = 1,95 \% \quad (4-14)$$

Pro výpočet úbytku napětí při uvažování FVE využiji stejný způsob s tím rozdílem, že od sumy činných výkonů odečtu instalovaný výkon FVE. Výsledný úbytek pak vychází následovně:

$$\Delta u_{2\%} = \frac{\sqrt{3} \cdot (\Delta U_{1FV} + \Delta U_{2FV})}{U_N} \cdot 100 = \frac{\sqrt{3} \cdot 55,7}{22\,000} \cdot 100 = 0,44 \% \quad (4-15)$$

Rozdílem těchto dvou úbytků zjistím, jaké je navýšení napětí způsobené instalovanou FVE při uvažovaném induktivním účinníku $\cos\varphi = 0,95$.

$$\Delta u_{FVE\%} = \Delta u_{1\%} - \Delta u_{2\%} = 1,95 - 0,44 = 1,52 \% \quad (4-16)$$

Z výsledku je patrné, že výrobná navyšuje hodnotu jmenovitého napětí o 1,52 %, tím je splněna podmínka pro síť VN. Nicméně z praktických důvodů je tato hodnota vysoká, neboť v případě potřeby bude obtížné připojit k síti další výrobnu tak, aby celkové navýšení napětí stále splňovalo limity dané normou. Vlastník FVE tak má možnost využít akumulaci, pak by maximální výkon dodávaný do sítě, při 1 MVA instalovaného výkonu elektrárny, mohl být například 250 kW, viz kapitola 4.3. Navýšení napětí spočítám stejným způsobem jako v předešlých případech:

$$I_{1AK} = \frac{\sum P_1 - P_{AKU}}{\sqrt{3} \cdot U_N \cdot \cos\varphi} = \frac{(1380 - 250) \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 22 \cdot 10^3 \cdot 0,95} = 31,22 \text{ A} \quad (4-17)$$

$$\begin{aligned} \Delta U_{1AK} &= R_{K,T1} \cdot I_{1AK} \cdot \cos\varphi + X_{T1} \cdot I_{1AK} \cdot \sin\varphi \\ &= 0,048 \cdot 31,22 \cdot 0,95 + 1,935 \cdot 31,22 \cdot 0,312 = 20,31 \text{ V} \end{aligned} \quad (4-18)$$

$$I_{2AK} = \frac{\sum P_2 - P_{AKU}}{\sqrt{3} \cdot U_N \cdot \cos\varphi} = \frac{(1280 - 250) \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 22 \cdot 10^3 \cdot 0,95} = 28,45 \text{ A} \quad (4-19)$$

$$\begin{aligned} \Delta U_{2AK} &= R_{V1} \cdot I_{2AK} \cdot \cos\varphi + X_{V1} \cdot I_{2AK} \cdot \sin\varphi \\ &= 3,906 \cdot 28,45 \cdot 0,95 + 8,379 \cdot 28,45 \cdot 0,312 = 179,94 \text{ V} \end{aligned} \quad (4-20)$$

$$\Delta u_{3\%} = \frac{\sqrt{3} \cdot (\Delta U_{1AK} + \Delta U_{2AK})}{U_N} \cdot 100 = \frac{\sqrt{3} \cdot 200,1}{22\,000} \cdot 100 = 1,57 \% \quad (4-21)$$

Získávám tedy úbytek v bodě A, způsobený instalací elektrárny s akumulací o dodávaném výkonu 250 kW. Celkové navýšení napětí určím opět rozdílem úbytků mezi sítí bez a s instalací výrobní.

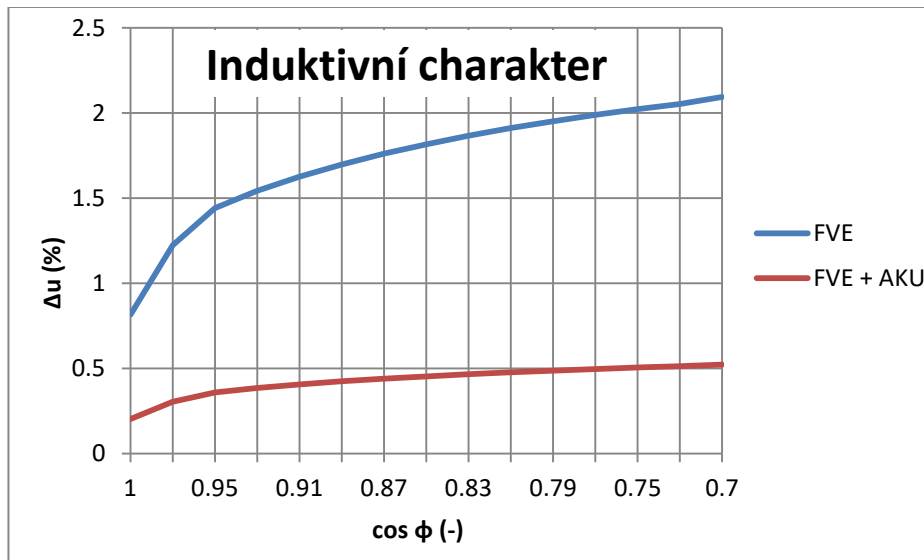
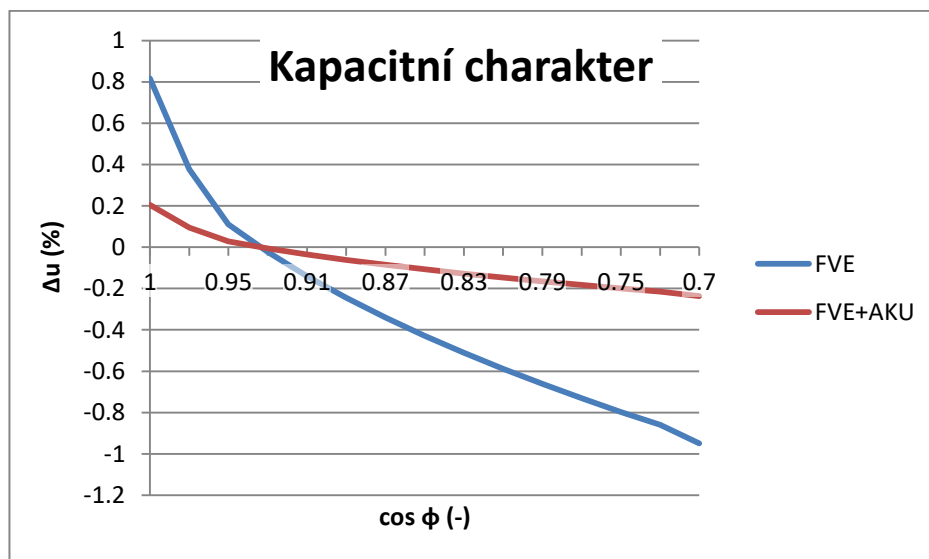
$$\Delta u_{AK\%} = \Delta u_{1\%} - \Delta u_{3\%} = 1,99 - 1,60 = 0,38 \% \quad (4-22)$$

Vzájemné porovnání vypočítaných navýšení napětí je uvedeno v *Tab. 6*.

Tab. 6: Porovnání navýšení napětí pro $\cos \varphi = 0,95$

Instalace	Δu % před (%)	Δu % po (%)	Rozdíl (%)
FVE	1.96	0.44	1.52
FVE+AKU	1.96	1.58	0.38

V programu Microsoft Excel jsem vytvořil tabulku výpočtů pro úbytky při různém úhlu zatížení čili s různým účínkem. Výsledné hodnoty jsou umístěny v Příloha B: Výpočet úbytků napětí. Následující grafy znázorňují přínos akumulace v porovnání s instalací samostatné fotovoltaické elektrárny z hlediska zvýšení napětí v oblasti jejich instalace.

Obr. 4.11: Závislost navýšení napětí (Δu) na indukčním účínku ($\cos \varphi$)Obr. 4.12: Závislost navýšení napětí (Δu) na kapacitním účínku ($\cos \varphi$)

Z grafů je zřejmý přínos akumulace pro snížení navýšeného napětí v síti jejího působení.

Rozsah účinníku je brán od 1 do 0,7 kapacitního i induktivního charakteru, síť s účinníkem kolem hodnot 0,7 by distributorem již nebyla provozována. Nicméně zvolil jsem tento rozsah pouze pro názornou ukázkou rozdílu úbytků mezi FVE a FVE s akumulací. Z grafu na *Obr. 4.12* tedy při kapacitním charakteru zátěže je zřejmé, že při hodnotě účinníku 0,93 dochází k vyrovnání úbytku v rozvodně A, čili napětí na začátku vedení 22 kV dosahuje v rozvodně A stejné hodnoty.

Využitím akumulace o konstantním výstupním napětí se rapidně snížilo navýšení napětí sítě v bodě A a zároveň je do sítě dodáváno stále stejné množství energie. K síti tak může být připojeno více zdrojů elektrické energie. Pokud by další instalované výrobní opěť využívaly akumulaci, výrazně by se zvýšilo množství dodané energie oproti situaci, kdy výrobní svou energii neakumulují a je potřeba počítat s jejich instalovaným výkonem, který jsou mnohdy schopny dodávat jen po krátký okamžik v určité době v roce.

Snížení nárůstu napětí může být využitelné pro síť NN, kde je v současné době problém s regulací odboček transformátoru tak, aby nevznikala přepětí či podpětí. Zvýšení napětí v síti VN má dopad na velikost napětí v síti NN, kdy celkové dovolené přepětí z obou sítí dle normy ČSN EN 50 160 je $2 + 3 = 5$ % (dopad na NN síť). Transformátor na hladině 110/22 kV bývá většinou provozován se zvýšeným výstupním napětím okolo 23,1 kV, z důvodu vysokých úbytků ve zbytku sítě, v NN síti bývá úbytek na konci vedení až 10 %. Z těchto důvodů bývá problematické určit velikost odbočky distribučního transformátoru 22/0,4 kV, který je ve většině případů regulovatelný v beznapěťovém stavu a manuálně.

Této situaci může být akumulace nápomocná, neboť jejím využitím u příslušného zdroje se sníží výkon dodávaný tímto zdrojem. Zároveň s tím i dopad na celkový nárůst napětí a tím se také sníží riziko vzniku přepětí či podpětí, neboť bude větší rezerva při nastavování odboček transformátorů.

4.6 Přínosy akumulace z hlediska lokálních a systémových vlivů

Nyní můžu zhodnotit, jaké technologické přínosy mají uvedené způsoby provozu akumulace. Jedná se tedy o provoz při konstantním výstupním výkonu a s optimalizovanou kapacitou pro přesun energie z odpoledních hodin do večerních. Dále je druhý ze zmíněných akumulátorů díky svému střídači doplněn o možnost řídit přetoky výkonů v rozvodně A.

Při provozu FVE s konstantním výkonem přináší akumulace výrazné snížení zatížení vedení, které je při běžném provozu FVE bez akumulace nárazově vytěžováno plným výkonem elektrárny a na vedení tak vznikají ztráty. S využitím optimalizované kapacity akumulátoru,

tedy úpravu dodávaného výkonu jen po určitou část dne, bude zatížení vedení také sníženo, ovšem méně než v předešlém případě z důvodu vyššího maximálního provozního výkonu. V prvním případě je maximální výkon FVE s akumulací 250 kW a ve druhém případě 400 kW. Kapacita akumulátorů je počítána takovým způsobem, aby při správném předpokládaném výkonu pro následující den byla vždy dostatečná. Systém by bylo vhodné doplnit ochranou, která by při překročení dodávaného výkonu do sítě přes povolenou mez elektrárnu odstavila. Tato ochrana by sloužila pro provozovatele soustavy jako záruka maximálního výkonu elektrárny.

Největším přínosem pro lokální vlivy je výrazná eliminace výstupního kolísavého výkonu, který je dodáván do přípojného místa elektrárny. Jak jsem již zmínil v kapitole 4.3, předpokládaný dodávaný výkon je vždy ohlášen dispečinku s jednodenním předstihem. Tím je dána velká výhoda pro provozovatele soustavy, který tak nemusí vynakládat své regulační prostředky pro kompenzaci proměnlivé výroby obnovitelných zdrojů. Tato výhoda je stejná u obou systémů provozu.

Přínosy omezení velikosti výstupního napětí jsem dokázal v kapitole 4.5, kde jsem uvažoval akumulátor pro dodávku konstantního výkonu. Je zde patrné snížení nárůstu napětí v soustavě, do níž je elektrárna připojena. V mém případě je tedy možné několikanásobně navýšit výkon výroben připojených do sítě VN. Tato skutečnost dává vzniknout daleko většímu prostoru pro využití obnovitelných zdrojů energie v síti. Snížení výstupního výkonu fotovoltaické elektrárny jsem uvažoval v obou případech dimenzování kapacity, tudíž oba systémy mají pozitivní vliv na zvýšení napětí v síti.

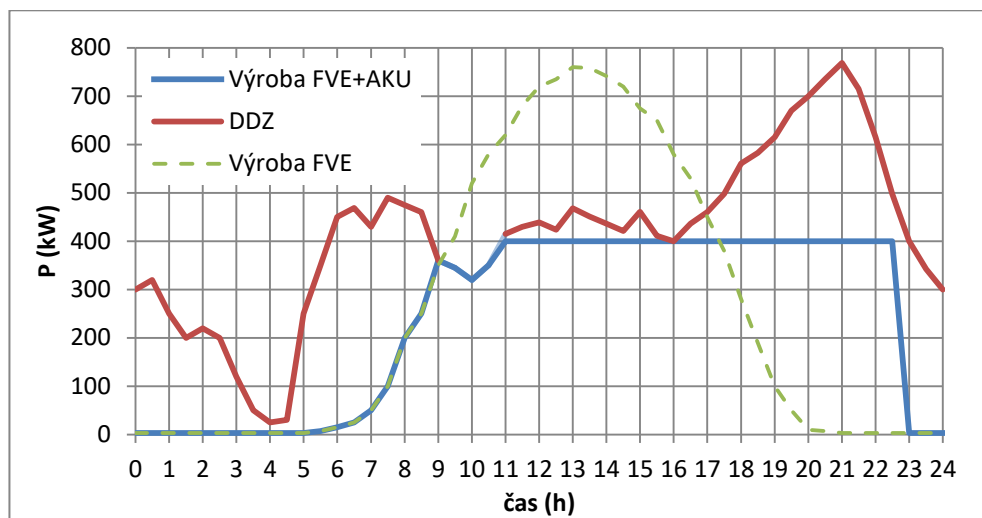
Z hlediska zkratových poměrů má snížení výstupního výkonu také příznivý vliv, ačkoliv v případě fotovoltaických elektráren není příspěvek ke zkratovému proudu zásadní. Tyto elektrárny jsou připojeny k síti přes střídač, který nedovoluje větší výstupní proud než jmenovitý, případně maximálně o 20 % vyšší. Nicméně snížením výkonu se také sníží tento výstupní jmenovitý proud.

Podobný dopad má emitace harmonických proudů, která je také převážně závislá na typu použitého střídače. Nicméně snížením zatížení střídače lze předpokládat také nižší počet emitovaných harmonických proudů přesahujících povolenou mez.

Flikr je taktéž dán parametry střídače, který by měl být certifikován na dodržení limit flikru povolených normou. Nicméně výpočty velikosti dlouhodobého vjemu flikru uvedené v normě

PNE 333430-0 vychází také z velikosti instalovaného výkonu zdroje, lze tedy předpokládat, že omezení výkonu elektrárny bude mít příznivý vliv na velikost flikru.

Největší vliv na systémové parametry vzniká při pokrytí zatížení odpovídající výrobou, k tomuto účelu velmi dobře slouží akumulátor navržený v kapitole 4.4. Kombinace výroby FVE, FVE společně s akumulací a zatížení v mé uvažované oblasti je znázorněna na *Obr. 4.13*. Z grafu je patrné, že využitím akumulace se přesunula elektrická energie z polední výrobní špičky do večerní špičkové spotřeby. Dodávka elektřiny potřebná z nadřazené sítě se tímto snížila ze 760 kW (dosaženo v 21:00) na 440 kW (dosaženo v 6:00), tedy pokles o cca 40 %. Jelikož je síť NN napájena skrz 3 transformátory o parametrech uvedených v kapitole 4.5, mohou být v tomto případě zatíženy pouze dva a to s dostatečnou rezervou. Navíc se vyrobená energie nemusí vracet zpět po síti, ale je spotřebována co nejbliž výrobě, tím se sníží ztráty a vedení společně s prvky sloužící pro přenos elektrické energie nebudou tolik namáhány procházejícím proudem.



Obr. 4.13: Využití akumulátoru pro snížení špiček zatížení v dané oblasti

Zároveň je na výše uvedeném grafu vidět funkce střídače pro omezení přetoků výkonů P a Q, kdy v čase 9:00 dochází k převýšení výroby oproti spotřebě. Střídač tuto situaci vyhodnotí a začne regulovat dodávaný výkon dle aktuálního zatížení oblasti, nedochází tak k přetokům činného výkonu do nadřazené soustavy. Řízení přetoků činného výkonu je až sekundární vlastností akumulace, čili střídač musí být schopný dle logiky řízení vyhodnotit, zda kapacita akumulátoru bude dostatečná pro akumulaci přebytečné energie po zbytek dne. Toto vyhodnocení může vzniknout na základě předpovědi dopadajícího slunečního záření na fotovoltaické panely. Pokud by kapacita již nebyla dostatečná pro akumulaci, je možné systém vybavit ochranou, která zajistí odstavení elektrárny.

5 Zhodnocení akumulace pomocí baterií

Zásadní otázkou využitelnosti jakéhokoliv nového produktu či projektu je ekonomika. Je třeba zjistit, zda je systém rentabilní a za jakých podmínek je využitelný. Aby bylo možné toto zhodnocení provést, je potřeba definovat parametry a investiční náklady uvažovaného systému. V mé práci jsem uvedl dva typy systémů.

5.1 Akumulátor pro konstantní výkon

V prvním případě jsem navrhl akumulátor za účelem eliminace proměnlivé výroby FVE a poskytnutí dostatečné kapacity pro dodávku konstantního výkonu po 24 hodin. Hodnota kapacity vyšla 4 875 kWh. Při využití článků LiFePO₄, viz Příloha A, budu uvažovat pořizovací cenu za 1 kWh tohoto článku 300 dolarů. Zvolil jsem hodnotu pod dolní hranicí cenového rozsahu uvedeného v Příloze A, neboť s rostoucí kapacitou výsledná cena za 1 kWh klesá. Jednoduchým násobkem kapacity akumulátoru ($W_{ak,celk}$), ceny článku za 1 kWh (CS_{LiFePO_4}) a kurzu dolaru (k), který uvažuji 25 Kč/\$, dostanu investiční cenu akumulátoru bez započtení veškerých vícenákladů spojených s realizací projektu.

$$Inv1 = W_{ak,celk} \cdot CS_{LiFePO_4} \cdot k = 4\,875 \cdot 300 \cdot 25 = 36\,562\,500 \text{ Kč} \quad (5-1)$$

Tato cena zahrnuje pouze potřebnou kapacitu baterie, v reálném případě však tato částka tvoří pouze 40-50 % z celkové sumy. Vícenáklady vznikají pořízením střídače, umístěním akumulátorů do vhodného kontejneru, systémy řízení a kontroly chodu, kabely pro propojení jednotlivých článků atd. Aby tato částka nabyla reálnějších rozměrů, je potřeba ji navýšit o 45 %.

$$Inv1' = Inv1 \cdot 1,45 = 36\,562\,500 \cdot 1,45 = 53\,015\,625 \text{ Kč} \quad (5-2)$$

Tímto jsem vypočetl investiční náklady na akumulátor, nicméně pro návratnost systému je potřeba určit podmínky, při jakých budou jeho vlastnosti uplatněny. Podle aktuálních legislativních podmínek není žádným způsobem uvažovaná penalizace za dodávku proměnlivého výkonu, jaký generují fotovoltaické nebo větrné elektrárny. Energetický zákon (č. 458/2000 Sb.) uvádí, že provozovatel zdroje elektrické energie je povinen dodržovat stanovené parametry kvality dodávky, jinak může být penalizován. Ovšem v cenových rozhodnutích ERÚ (např. č.2/2017) nejsou penalizace pro zdroje obnovitelné energie jakkoliv

uvažovány. Ani distribuční společnosti připojující obnovitelné zdroje do svých sítí těmto výrobcům žádné poplatky za proměnlivý výkon neúčtují.

V současné situaci tedy není z ekonomického pohledu důvod pro pořízení takovéto akumulace. V mém případě budu uvažovat, že s narůstající penetrací obnovitelných zdrojů v elektrizační soustavě budou zavedeny penalizace za nedodržení nasmlouvané dodávky elektrické energie. Princip nasmlouvané dodávky jsem uvedl v kapitole 4.3, kdy k predikci dodávaného výkonu pro další den dochází s jednodenním předstihem. Výkupní ceny elektrické energie se budou snižovat o 20 % za každý den, kdy bude skutečné množství dodané energie větší o 10 % nebo nižší o 15 %, než bude hodnota nasmlouvané dodávky. V situaci FVE bez akumulace je jasné, že tyto podmínky nebudou dodrženy ve velké části roku. Jako maximální rozptyl predikce výroby uvažuji 20 % pro kladné i záporné hodnoty. Pro zjednodušení předpokládám, že odchylky výroby budou rovnoměrně rozděleny. Energie účtovaná za nižší cenu (W_{penal}) v jednom roce vychází z následujícího vztahu:

$$W_{penal} = \frac{\frac{20 - \delta_{klad}}{20} + \frac{20 - \delta_{záp}}{20}}{2} \cdot W_{rok} = \frac{\frac{20 - 10}{20} + \frac{20 - 15}{20}}{2} \cdot 1100 \cdot 10^6 = \quad (5-3)$$

$$= 412,5 \text{ MWh}$$

Symbol δ_{klad} značí kladnou odchylku, $\delta_{záp}$ zápornou odchylku a W_{rok} je energie vyrobená elektrárnou o výkonu 1 MWp za rok. Tuto hodnotu jsem získal simulací elektrárny pomocí programu Sunny Design Web.

Nezbytným parametrem je také výkupní cena elektřiny, která je v současné době pro nově postavené fotovoltaické elektrárny o výkonech větších než 100 kWp nulová. Ovšem při uvažování elektrárny postavené v roce 2010, kdy bylo postaveno největší množství fotovoltaických zdrojů v ČR, budu uvažovat výkupní cenu elektřiny 12 150 Kč/MWh, která zároveň zahrnuje i státní dotace. Prostá návratnost systému (PB) pak vychází dle následujícího vztahu:

$$PB = \frac{I'_{nv1}}{W_{penal} \cdot 0,2 \cdot c_{výk}} = \frac{53,015 \cdot 10^6}{412,5 \cdot 0,2 \cdot 12\,150} = 52,8 \text{ let} \quad (5-4)$$

I'_{nv1} značí investiční náklady akumulace, W_{penal} je energie účtovaná za nižší cenu, hodnota 0,2 vyjadřuje snížení výkupní ceny energie o 20 % při nedodržení hodnoty nasmlouvané energie a $c_{výk}$ udává výkupní cenu elektřiny.

Doba návratnosti dle výše uvedených parametrů vychází na zhruba 53 let. Taková doba je

naprosto nereálná, neboť několikanásobně přesahuje dobu životnosti veškerých instalovaných komponentů. Z hlediska životnosti jsou lithiové baterie nejslabším článkem projektu, většinou se u nich uvažuje 10 – 15 let provozu. Z uvedeného vztahu (5-4) lze odvodit způsoby pro zlepšení návratnosti celého systému. Jednou z cest je snížení investiční ceny za bateriový systém, toho může být dosaženo v blízké budoucnosti, kdy se počítá s poklesem ceny lithiových baterií. Další možností, jak snížit počáteční cenu, je zavedení dotací podporující tento typ OZE.

Dalším způsobem, jak snížit návratnost systému, je zvýšení penalizace. Pokud by například vlastník tohoto zdroje měl zaplatit při nedodržení smlouveného objemu energie stejnou částku, jakou je vyplácen, tedy 12 150 Kč/MWh, prostá návratnost by v takovém případě vyšla následovně:

$$PB = \frac{I'_{nv1}}{W_{penal} \cdot 2 \cdot c_{výk}} = \frac{53,015 \cdot 10^6}{412,5 \cdot 2 \cdot 12150} = 5,28 \text{ let} \quad (5-5)$$

Taková doba návratnosti se jeví mnohem lépe, nicméně výše penalizace je až nereálně vysoká. Nelze tedy očekávat, že takovýchto poplatků bude někdy dosaženo.

5.2 Akumulátor s optimalizovanou kapacitou

Kapacita tohoto akumulátoru je určena pro akumulaci energie v poledních hodinách a následně její využití ve večerních hodinách, tím dojde ke snížení zatížení vedení a zároveň k lepšímu využití energie vyrobené fotovoltaickou elektrárnou. V kapitole 4.4 počítám kapacitu akumulátoru dle výroby FVE při nejslunečnějším dni v roce, z toho vyplývá, že po většinu roku nebude kapacita plně využita. Navrhl jsem tedy další využití akumulátoru a to pro regulaci přetoků výkonů P a Q. Tato vlastnost vychází ze speciálně vybaveného střídače, který vyhodnocuje měření z rozvodny A. Příklad tohoto systému řízení je navržen například ve studii dle zdroje [41], kde se systém nazývá STATCOM/BESS.

Náklady na tento systém se skládají z ceny akumulátoru a ceny za řídicí systém. Cenu akumulátoru je možné počítat stejným způsobem jako v předchozí kapitole. Cenu za řídicí systém je velmi těžké určit, neboť toto řešení není běžně využíváno a je spíše předmětem studií. Vzhledem k tomu, že nemohu určit celkové náklady na celý systém, uvedu zde pouze postup výpočtu s uvážením jednotlivých parametrů, které budou mít vliv na celkovou návratnost tohoto řešení.

Podstatným bodem ekonomického zhodnocení je definování finančních přínosů z využití

navrhovaného systému akumulace. Tento systém stejně jako akumulátor v předchozí kapitole přispívá ke stabilizaci výstupního výkonu FVE. Tudíž při zavedení penalizace za nedodávku nasmlouvané energie a dodržení maximálního výstupního výkonu, viz předchozí kapitola, bude také tato akumulace výrazně přispívat k jejímu omezení. Systém navíc reaguje na potřeby zátěže, tudíž by neměl nastat případ, kdy elektrárna bude generovat větší výkon, než je potřebný výkon pro zátěž v dané oblasti. Tato skutečnost může také být zohledněna ve finančních benefitech.

Schopnost systému omezovat přetoky P a Q do vyšší napěťové soustavy není v současné době žádným způsobem ekonomicky zohledněna v české legislativě. S výhledem do budoucna uvažují, že by mohl být zaveden systém penalizace za přetoky činných i jalových výkonů v pilotních uzlech soustavy. Poté by zde vznikl další ekonomický potenciál pro mnou navrhované řešení. Pro distribuční společnost by například mohlo být výhodné platit měsíčně nasmlouvanou finanční částku provozovateli akumulace s řízením přetoků, který se tak zaručí za udržení požadovaného účinníku v uzlu soustavy, do kterého je připojen. Nasmlouvaná finanční částka tak bude urychlovat návratnost celé investice.

Dalším ekonomickým potenciálem pro kratší dobu návratnosti může být dotace poskytnutá z některého fondu pro rozvoj obnovitelných zdrojů. Při uvažování těchto parametrů pak získávám vztah pro prostou návratnost při optimalizaci kapacity (PB_{opt}).

$$PB_{opt} = \frac{I_{inv2} - \sum c_{m\acute{e}s} - c_{dot}}{W_{penal2} \cdot 0,2 \cdot c_{v\acute{y}k}} \quad (5-6)$$

Ve vztahu I_{inv2} značí investiční cenu na pořízení celého systému akumulace, $\sum c_{m\acute{e}s}$ je součet měsíčních výdělků od distributorské firmy za dobu trvání smluvního vztahu, c_{dot} vyjadřuje částku poskytnutou jako dotaci na realizaci zařízení a část ve jmenovateli, tedy $W_{penal2} \cdot 0,2 \cdot c_{v\acute{y}k}$, symbolizuje stejně jako v předchozí kapitole poplatky za energii účtovanou při 20% násobku nasmlouvané výkupní ceny za vyrobenou elektrickou energii.

5.2.1 Využití u LDS

Přínos především z hlediska ekonomiky provozu by mohl být také pro provozovatele lokální distribuční soustavy (LDS). Pokud by dle modelového příkladu na *Obr. 4.8* byla provozována část od rozvodny A jako LDS, tedy fotovoltaická elektrárna s akumulací a síť NN, měla by akumulace vliv na konečnou cenu energie pro provozovatele.

Výsledná cena dodávané elektrické energie se skládá z několika částí, zahrnuje například cenu

za silovou energii, poplatky za distribuci a rezervovanou kapacitu. Dále je součástí poplatků za podporu obnovitelných zdrojů, za systémové služby a přenos energie, které poskytuje ČEPS a v neposlední řadě operátor trhu (OTE) má také malý podíl na výsledné ceně elektřiny. Dle tiskové zprávy ERÚ o regulovaných cenách elektrické energie pro rok 2016 [42] lze určit, že výrobní náklady na elektrickou energii tvoří cca 41 % z celkové ceny, dále pak poplatky za distribuční služby 39 % a zbylých 20 % jsou platby za přenos, systémové služby a podporu OZE.

Tím, že si provozovatel LDS bude sám vyrábět velkou část energie, kterou v plné míře využije ve své odběrné části sítě, ušetří značné finanční prostředky spojené s dodávkou elektřiny ze sítě. Elektřina vyrobená fotovoltaickou elektrárnou nebude navýšena o distribuční a další poplatky.

Zároveň využitím akumulace dojde ke snížení rezervované kapacity, která udává maximální hodnotu čtvrt hodinového elektrického výkonu, kterou může oprávněný zákazník odebrat. Zákazník se tak zavazuje tento výkon nepřekročit, jinak mu bude účtována pokuta. K nasmlouvání hodnoty této kapacity dochází každý měsíc a účtována je měsíčně jednorázovým poplatkem dle uzavřené smlouvy. Vlivem akumulace dojde v oblasti ke snížení odebíraného výkonu ze sítě, tudíž bude možné snížit hodnotu rezervované kapacity a spolu s tím snížit i náklady spojené s velikostí této kapacity.

5.3 Legislativa

Obě zmiňovaná řešení v současné době narážejí na legislativní omezení, kdy energetický zákon 458/2000 Sb. ani navazující vyhlášky akumulaci v bateriích vůbec neuvažují. Jedná se však o velmi diskutované téma a tak lze v tomto směru očekávat změny v legislativě. Prozatím není například jasné, zda může být akumulace využita pro řešení vnitřních problémů v distribuční a přenosové soustavě. Zda je možné akumulaci uvažovat jako zdroj a tedy předmět podnikání. Dále je dle Vyhlášky 541/2005 Sb. možné obchodovat pouze s činnou energií, obchodování s jalovou energií umožněno není. Toto jsou hlavní otázky, které je potřeba vyřešit, aby mohla být akumulace plně využita.

Závěr

Cílem této diplomové práce bylo najít vhodné využití pro akumulaci pomocí elektrochemických baterií, následně zpracovat modelový příklad zvoleného řešení a celý systém vyhodnotit z technologického i ekonomického hlediska.

Práce začíná představením dostupných technologií akumulace a následně se zabývá současným a potenciálním využitím akumulace v jednotlivých částech sítě. Jsou zde také uvedeny výhody, jaké využití takovýchto úložišť přináší. Jelikož je v současné době kladen celosvětově velký tlak na čím dál tím větší začleňování obnovitelných zdrojů energie do výroby elektrické energie, rozhodl jsem se zaměřit svou práci na zlepšení integrace obnovitelných zdrojů v elektrizační soustavě. K tomu jsem využil bateriové úložiště umístěné v těsné blízkosti zdroje obnovitelné energie, který v mém případě zastupuje fotovoltaická elektrárna.

Technologické zpracování a chemické složení baterií je v dnešní době velmi rozmanité a je předmětem mnoha výzkumů. V druhé kapitole jsou uvedeny nejrozšířenější typy dnes používaných technologií, následně jsem v závěru této kapitoly a v příloze A vypracoval jejich vzájemné porovnání. Z mého pohledu se jeví jako nejuniverzálnější řešení lithiové baterie, konkrétně články typu NMC a LiFePO₄. Ty poskytují kompromis mezi dostatečnou hustotou energie a měrným výkonem. Tím pádem dokáží rychle reagovat a jsou schopny v sobě uložit velké množství energie s menšími prostorovými nároky oproti jiným typům článků. Zároveň dosahují vysoké životnosti z pohledu cyklů nabití/vybití a mohou být zatěžovány výrazně vyšším proudem, než je jejich jmenovitý. Vzhledem k tomu, že baterie by měla sloužit u fotovoltaické elektrárny, která za proměnlivého počasí generuje velmi kolísavý výkon, využil bych již zmíněné lithiové články.

Připojení nové výroby do elektrizační soustavy s sebou nese různá rizika. Především obnovitelné zdroje, které se vyznačují dodávkou kolísavého výkonu, ohrožují stabilitu napětí v soustavě. Ve třetí kapitole jsem se zaměřil na popis vlivů, které jsou způsobeny připojením fotovoltaické elektrárny do soustavy. Podrobněji jsem zde popsal především ty vlivy, na které by mělo využití akumulace pozitivní dopad. Předpokládal jsem zlepšení z hlediska dopadů na zvýšené napětí v soustavě po připojení nového zdroje, dále udržení odchylek a nesymetrie napětí v tolerovaných mezích, omezení přetoků činných a jalových výkonů v uzlech soustavy a zlepšení stability frekvence sítě, která je dána především tokem činného výkonu.

Abych mohl dokázat přínosy akumulace, vytvořil jsem si v kapitole čtyři modelový příklad

sítě, kde je umístěna fotovoltaická elektrárna o výkonu 1 MVA, jejímž účelem je dodávat energii do oblasti nízkého napětí. K této oblasti jsem si vytvořil denní diagram zatížení a k fotovoltaické elektrárně graf maximální vyrobiteľné energie za jeden den v roce. Aby bylo dosaženo lepší integrace elektrárny do sítě, rozhodl jsem se provést návrh takové kapacity akumulátoru, která by zajistila konstantní dodávaný výkon po 24 hodin. Z grafu maximální výroby jsem určil nejvyšší dodávaný konstantní výkon 250 kW. Dále jsem dle grafu určil potřebnou kapacitu baterie, která vyšla na 4875 kWh. Tato kapacita je tedy dostatečná, aby zajistila při nejslunečnějším dni v roce využití veškeré vyrobené energie a nepřekročení výstupního výkonu 250 kW. Jelikož je výroba závislá na počasí, doporučuji vzhledem k dispečerskému řízení sítě, aby předpokládaný konstantní výkon pro následující den byl vždy ohlášen dispečinku s jednodenním předstihem. Výkon by se určil na základě předpovědi počasí.

Předchozí návrh nerespektuje zatížení oblasti a kapacita baterie vyšla dosti vysoká, s čímž jsou spojeny značné investiční náklady. Rozhodl jsem se tedy kapacitu optimalizovat takovým způsobem, aby zajistila maximální využití vyrobené energie v oblasti nízkého napětí. Energie se akumuluje, pokud výkon elektrárny překročí nastavený limitní výkon daný opět předpovědí počasí, nebo v případě, kdy výroba převyšuje spotřebu. Druhou podmínku zajišťuje speciálně vybavený střídač u baterie. Kapacita pro tuto baterii vyšla 1993 kWh.

Oba tyto systémy mají výrazný vliv na zlepšení stability napětí v soustavě. Důkaz o snížení procentuálního navýšení napětí jsem provedl v kapitole 4.5.2. Uvažoval jsem první návrh akumulace, tedy maximální výstupní výkon 250 kW. Instalací tohoto systému bylo při uvažovaném účinníku 0,95 induktivního charakteru navýšeno napětí o 0,38 % v síti VN. Při instalaci samotné fotovoltaické elektrárny bylo napětí navýšeno o 1,52 %. Je tedy zřejmé, že využitím akumulace bylo výrazně sníženo toto navýšení, v síti je tak možné instalovat daleko více zdrojů obnovitelné energie. Omezení přetoků činných a jalových výkonů jsem dosáhl využitím střídače, který hlídá v rozvodně A velikost a fázový úhel napětí. Navíc bylo dosaženo také eliminace kolísavého výstupního výkonu. Provozovatel soustavy tak nemusí řešit problémy s regulováním těchto výkonů.

Pořízení systémů akumulace navržené v mé práci není v dnešní době z ekonomického hlediska vůbec výhodné. S ohledem na životnost celého zařízení zde prakticky není žádná návratnost. Aby zde vznikla motivace investorů k pořízení těchto bateriových systémů, muselo by být zohledněno, že vlastník elektrárny reguluje a dodává do sítě předem očekávaný výkon. Jednou z možností je tedy zavést penalizaci za nedodržení nasmlouvané dodávky

energie. Tento princip jsem uvedl v páté kapitole, kdy při překročení dodávané energie o 10 % nebo nedodání o více než 15 % bude vlastníkovi elektrárny vyplácena o 20 % menší výkupní cena elektřiny. Ovšem i s tímto principem vyšla doba návratnosti na 53 let. Bylo tedy potřeba vymyslet další ekonomický potenciál. Akumulace bude výrazně přispívat pro zlepšení kvality napětí, lze tedy očekávat dosažení dotační podpory na investici do tohoto zařízení buď ze strany státu, nebo Evropské unie. Další potenciál představuje schopnost systému omezovat přetoky činného a jalového výkonu. Pokud by tyto přetoky v pilotních uzlech soustavy byly penalizovány, vlastník bateriového systému s možností řízení přetoků by mohl být odměňován za udržování požadovaného účinníku v uzlu soustavy. V případě, kdy by tento systém byl provozován v lokální distribuční soustavě, mohl by jeho vlastník výrazně ušetřit za poplatky spojené s dodávkou elektřiny ze sítě. Zároveň také sníží svou rezervovanou kapacitu, díky čemuž bude moct každý měsíc platit menší poplatek. Návratnost investice je dále možné snížit tím, že přebytečná kapacita baterie bude využita pro tzv. energetickou arbitráž. Například v zimních měsících, kdy elektrárna přes den plně nenabije kapacitu baterie, se bude baterie nabíjet přes noc z distribuční sítě. Následující den pak bude tato energie prodána v období vysoké poptávky za vyšší cenu, než za jakou byla nakoupena.

Bateriové systémy navrhnuté v této práci nemají aktuálně v České republice využití. Je to dáno především ekonomickými a legislativními podmínkami. Ovšem v zahraničí již podobné projekty fungují a začínají se využívat v čím dál větší míře. Mnoho firem se předhání ve vývoji lepšího bateriového článku a také pořizovací cena těchto článků stále klesá. Baterie se tak stávají dostupnější. V blízké budoucnosti lze očekávat, že se tyto systémy stanou nedílnou součástí energetiky.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] XING, Luo, JIHONG, Wang, DOONER, Mark a CLARKE, Jonathan. Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation. *Elsevier: Applied Energy*. 1. 1. 2015 (Volume 137), 25. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.09.081>
- [2] BUDÍN, Jan. Technologický plán akumulace energie [online]. Poslední změna 14. 2. 2015 [Cit. 29.5.2016]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/elektrina/akumulace-energie/technologicky-plan-v-oblasti-akumulace-energie/>
- [3] Využívání vodní energie v ČR. *Skupina ČEZ* [online]. [Cit. 29. 5. 2016]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/obnovitelne-zdroje/voda/informace-o-vodni-energetice.html>
- [4] Compressed Air Energy Storage (CAES). *Energy Storage Association* [online]. [Cit. 29. 5. 2016]. Dostupné z: <http://energystorage.org/compressed-air-energy-storage-caes>
- [5] BROWN, BOVERI and CIE. Huntorf Air Storage Gas Turbine Power Plant [online]. [Cit.29. 5. 2016]. Dostupné z: https://www.eon.com/content/dam/eon-content-pool/eon/company-asset-finder/asset-profiles/shared-ekk/BBC_Huntorf_engl.pdf
- [6] Commission (2013). Green Paper: A 2030 framework for Climate and Energy Policies. [Cit. 30. 5. 2016]. COM (2013) 169 final, Brussels: European Commission.
- [7] Státní energetická koncepce České republiky. *Ministerstvo průmyslu a obchodu* [online]. Poslední změna 10. 5. 2010 [Cit. 30. 5. 2016]. Dostupné z: <http://www.mpo.cz/dokument5903.html>
- [8] Akumulace energie z OZE ve vodíku: ÚJV Řež představil podrobné výsledky projektu [online]. Poslední změna 16. 10. 2015 [Cit. 30. 5. 2016]. Dostupné z: <http://www.proelektrotechniky.cz/obnovitelne-zdroje/77.php>

- [9] Technology Roadmap: Energy Storage. *International Energy Agency* [online]. Poslední změna 19. 3. 2014 [Cit. 31. 5. 2016]. Dostupné z: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/technology-roadmap-energy-storage-.html>
- [10] MAYER, Daniel. Superkondenzátory. *ELEKTRO*, 2016, **26**, 68. ISSN 1210-0889
- [11] WESOFF, Eric. First Grid-Scale Rail Energy Storage Project Gets Environmental Approval From BLM [online]. Poslední změna 18. 4. 2016 [Cit. 2. 6. 2016]. Dostupné z: <http://www.greentechmedia.com/articles/read/First-Grid-Scale-Rail-Energy-Storage-Project-Gets-Environmental-Approval-Fr>
- [12] PARFOMAK, Paul W. Energy Storage for Power Grids and Electric Transportation: A Technology Assessment. *Congressional Research Service*. 27. 3. 2012 R42455, str. 146. DOI: <https://fas.org/sgp/crs/misc/R42455.pdf>
- [13] FUCHS, Georg, LUNZ, Benedikt, LEUTHOLD, Matthias, SAUER, Uwe. Technology Overview on Electricity Storage. *Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe*. 1. 6. 2012 str. 66.
- [14] Grid Scale Energy Storage. *Ares the power of gravity* [online]. [Cit. 2. 6. 2016]. Dostupné z: <http://www.aresnorthamerica.com/grid-scale-energy-storage>
- [15] Abeceda baterií a akumulátorů. *Battex* [online]. [Cit. 9. 10. 2016]. Dostupné z: <http://www.battex.info/elektrochemicke-zdroje-proudu-obecne/definice>
- [16] The Economics of battery energy storage. *RMI* [online]. Poslední změna 1. 10. 2015 [Cit. 9. 10. 2016]. Dostupné z: <http://www.rmi.org/Content/Files/RMI-TheEconomicsOfBatteryEnergyStorage-FullReport-FINAL.pdf>
- [17] Grid Scale Energy Storage Systems. *Electropedia* [online]. Poslední změna 16. 6. 2015 [Cit. 20. 11. 2016]. Dostupné z: http://www.mpoweruk.com/grid_storage.htm
- [18] Specification Approval Sheet. *TENERGY* [online]. [Cit. 20. 2. 2017]. Dostupné z: http://www.all-battery.com/datasheet/10103_datasheet.pdf

- [19] Lithium Ferro Phosphate Batteries. *Pbq* [online]. [Cit. 20. 2. 2017]. Dostupné z: <http://www.pbqbatteries.com/media/datasheet/lithium-ferro-phosphate-batteries-vs-vrla-batteries.pdf>
- [20] Battery and Energy Technologies. *Electropedia* [online]. Poslední změna 17. 5. 2015 [Cit. 1. 3. 2017]. Dostupné z: <http://www.mpoweruk.com/lithiumS.htm>
- [21] REICHL, Tomáš. Průtokové baterie [online]. Poslední změna 14. 3. 2015 [Cit. 1. 3. 2017]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/technologie/elektroenergetika/prutokova-baterie/>
- [22] COWIE, Ivan. All About Batteries, Part 9: Sodium Sulfur (NaS). *EETimes* [online]. Poslední změna 14. 7. 2014 [Cit. 1. 3. 2017]. Dostupné z: http://www.eetimes.com/author.asp?section_id=36&doc_id=1323091
- [23] SHWARTZ, Mark. Aluminum battery from Stanford offers safe alternative to conventional batteries. *Stanford* [online]. Poslední změna 6. 4. 2015 [Cit. 1. 3. 2017]. Dostupné z: <http://news.stanford.edu/2015/04/06/aluminum-ion-battery-033115/>
- [24] Battery Energy Storage Study for the 2017 IRP. *PacifiCorp* [online]. Poslední změna 22. 8. 2016 [Cit. 5. 3. 2017]. Dostupné z: http://www.pacificorp.com/content/dam/pacificorp/doc/Energy_Sources/Integrated_Resource_Plan/2017_IRP/10018304_R-01-D_PacifiCorp_Battery_Energy_Storage_Study.pdf
- [25] TOŠER, Pavel, VACULÍK, Sebastian, BAČA, Petr. Náklady na akumulaci elektřiny v sekundárních člancích. *tzbinfo* [online]. Poslední změna 23. 9. 2013 [Cit. 5. 3. 2017]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/10362-naklady-na-akumulaci-elektriny-v-sekundarnich-clancich>
- [26] BU-107: Comparison Table of Secondary Batteries. *Battery University* [online]. Poslední změna 11. 4. 2016 [Cit. 4. 3. 2017]. Dostupné z: http://batteryuniversity.com/learn/article/secondary_batteries
- [27] BRUNET, Yves. *Energy storage*. Hoboken, NJ: Wiley, 2011. ISBN 978-1-84821-183-4.

- [28] HUGGINS, Robert A. *Energy storage*. New York: Springer, c2010. ISBN 978-1-4419-1023-3.
- [29] E-shop akumulátorů [online]. [Cit. 4. 3. 2017]. Dostupné z: <http://www.ostrovni-elektrarny.cz>
- [30] E-shop akumulátorů [online]. [Cit. 4. 3. 2017]. Dostupné z: <https://www.obchodsolar.cz>
- [31] E-shop akumulátorů [online]. [Cit. 4. 3. 2017]. Dostupné z: <http://www.batteryspace.com>
- [32] E-shop akumulátorů [online]. [Cit. 4. 3. 2017]. Dostupné z: www.all-battery.com
- [33] Cellcube. *American Vanadium* [online]. [Cit. 4. 3. 2017]. Dostupné z: www.americanvanadium.com/cellcube.php
- [34] NAS Energy Storage System. *NGK INSULATORS, LTD.* [online]. [Cit. 4. 3. 2017]. Dostupné z: <https://www.ngk.co.jp/nas/>
- [35] Pravidla provozování distribučních soustav – Příloha 4. Pravidla pro paralelní provoz zdrojů se sítí provozovatele distribuční soustavy. Energetický regulační úřad. 2016. Dostupné z: https://www.eru.cz/documents/10540/2041318/CEZ_P%C5%99%C3%ADloha+%C4%8D.+4.pdf/7b16c2c8-47c8-4dcf-91a2-9a89d56e2bd9
- [36] HROUDA, PROCHÁZKA, KYSNAR. Vliv charakteristik Q/U a P/U FVE na velikost připojitelného výkonu v sítích NN. *Konference ČK CIRED 2016*.
- [37] FATHIMA,Hina, PALANISAMY. Optimized Sizing, Selection, and Economic Analysis of Battery Energy Storage for Grid-Connected Wind-PV Hybrid System. 22. 11. 2015 (Volume 2015). Article ID 713530, str. 16 [Cit. 20. 3. 2017]. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1155/2015/713530>
- [38] Parametry vedení a transformátorů. *Vysoká škola Báňská*. [Cit. 20. 3. 2017]. Dostupné z: http://fei1.vsb.cz/kat410/studium/studijni_materialy/katalogy/parametry.doc

- [39] MICHL, Pavel. *Začleňování fotovoltaických elektráren do elektrizační soustavy*. Brno, 2010. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav elektroenergetiky.
- [40] DynaPeaQ. SVC Light with Energy Storage. ABB [Cit. 20. 3. 2017]. Dostupné z: [http://www02.abb.com/global/gad/gad02181.nsf/0/1c9442cf6083140ac1257a62003621b5/\\$file/DynaPeaQ+-+SVC+Light+with+Energy+Storage.pdf](http://www02.abb.com/global/gad/gad02181.nsf/0/1c9442cf6083140ac1257a62003621b5/$file/DynaPeaQ+-+SVC+Light+with+Energy+Storage.pdf)
- [41] CHAKRABORTY, MUSUNURI, SRIVASTAVA, KONDABATHINI. Integrating STATCOM and Battery Energy Storage System for Power System Transient Stability: A Review and Application. *Advances in Power Electronics*. 17. 10. 2012 (Volume 2012). Article ID 676010, str. 12 [Cit. 20. 3. 2017]. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1155/2012/676010>
- [42] Tisková zpráva k cenovým rozhodnutím ERÚ č.7/2015 a č.8/2015, o regulovaných cenách souvisejících s dodávkou elektřiny pro rok 2016. ERÚ [Cit. 20. 3. 2017]. Dostupné z: https://www.eru.cz/documents/10540/1130534/20151126_TZ_CR_2016_elektro.pdf/d123da7a-c861-4acb-8ba6-0b4e38fea389

Příloha A: Porovnání parametrů sekundárních článků

	Pb	NiMH	NaS	VRB	ZnBr	LiCoO2	LiFePO4	LiMn2O4	NMC
Hustota energie (Wh/L)	75-120	220-330	x	25-40	70	x	220	x	150-300
Hustota energie (Wh/kg)	30-50	60-120	150-240	25-35	75-85	150-250	90-120	100-150	150-220
Měrný výkon (W/kg)	700	900	150-230	x	x	200-518	150-495	100-400	150-570
Počet cyklů nab/vyb (80% DOD)	200 - 400	1000	2500-4500	20000 (100% DOD)	3000 (100% DOD)	500-1000	>2500	500-1000	1000-3000
Doba nabíjení (h)	6-18	2-4	x	x	x	2-4	0.5-1		3
Samovybíjení/měsíc (25°C)	0.05%	0.30%	0.10%	0.20%	0.50%	0.05%			0.03%
Napětí článku (V)	2	1.2	1.7	1.15-1.55	48	3.6	3.2-3.3	3.7	3.6-3.7
Maximální napětí (V)	2.4	1.4	1.9	x	57	4.2	3.65	4.2	3.8-4.2
Minimální napětí (V)	1.75	1	1.4	x	40	2.5-3	2.5-3	2.5-3	2-2.5
Max zátěžný proud	5C	5C	x	x	x	>3C	>30C		15C -20C
Jmenovitý vybíjecí proud	0.2C	0.5C	x	x	0.2C	<1C	<10C		1C
Teplotní rozsah okolí (°C)	-20 až 60	-10 až 60	-20 až 40	-15 až 45	-10 až 50	-20 až 60			
Potřeba údržby	1x120 dní	1x90dní	nízká	nízká	nízká	Ne			
Bezpečnost	vysoká	potřeba pojistky	nízká	nízká	nízká	potřebuje bezpečnostní obvod			nízká
Ekologická závadnost	vysoká	nízká							
Účinnost (%)	60-90	65-85	75-83	60-80	60-80	85-99	85-99	85-99	85-99
Požizovací cena (\$/kWh)	100-400	x	500-1000	300-700	520-800	x	350-550	300-400	320-450
Výrobce	Varta, Narada, Trojan, Victron	Sanyo, SAFT, Panasonic, Varta, GP	NGK	American Vanadium (CellCube), Imergy, Vionx	Emphase, Primus Power Flow, RedFlow		A123, Tesla, Saft, Sony, Thundersky	Sanyo, Sony, Moli, LG Chem	HE3DA, Hitachi, LG Chem, Panasonic, Samsung, XALT

Zdroje: [24][25][26][27][28][29][30][31][32][33][34]

Příloha B: Výpočet úbytků napětí

cos	Bez FVE		S FVE		S FVE+A KU:		Úbytek		Úbytek		navýšení	
	proud I1 (A)	proud I2 (A)	38.120	35.358	proud I1 (A)	proud I2 (A)	11.877	9.115	1 (V)	2 (V)	(%)	(%)
Induktivní												
1	1.860	138.108	1.102	0.579	35.602	0.285	0.817	1.540	112.481	0.898	0.204	
0.98	16.504	194.301	1.660	5.142	50.088	0.435	1.225	13.664	158.248	1.353	0.306	
0.95	24.804	223.711	1.957	7.728	57.669	0.515	1.442	20.535	182.200	1.596	0.360	
0.93	28.847	237.335	2.096	8.988	61.181	0.552	1.543	23.882	193.296	1.710	0.386	
0.91	32.281	248.511	2.211	10.058	64.062	0.584	1.627	26.725	202.399	1.804	0.407	
0.89	35.295	258.000	2.309	10.997	66.508	0.610	1.699	29.220	210.127	1.884	0.425	
0.87	37.994	266.227	2.395	11.838	68.629	0.634	1.762	31.455	216.828	1.955	0.440	
0.85	40.446	273.458	2.471	12.602	70.493	0.654	1.817	33.485	222.717	2.017	0.454	
0.83	42.694	279.874	2.540	13.302	72.147	0.673	1.867	35.346	227.943	2.073	0.467	
0.81	44.772	285.605	2.601	13.949	73.624	0.689	1.912	37.066	232.610	2.123	0.478	
0.79	46.703	290.746	2.657	14.551	74.950	0.705	1.952	38.665	236.797	2.169	0.488	
0.77	48.505	295.372	2.707	15.113	76.142	0.718	1.989	40.157	240.565	2.210	0.497	
0.75	50.194	299.541	2.753	15.639	77.217	0.731	2.022	41.555	243.960	2.248	0.506	
0.73	51.781	303.299	2.796	16.133	78.186	0.743	2.053	42.869	247.021	2.282	0.513	
0.7	53.990	308.250	2.852	16.821	79.462	0.758	2.094	44.698	251.053	2.328	0.523	
Kapacitní												
1	1.860	138.108	1.102	0.579	35.602	0.285	0.817	1.540	112.481	0.898	0.204	
0.98	-12.859	76.390	0.500	-4.006	19.692	0.123	0.377	-10.646	62.215	0.406	0.094	
0.95	-21.270	38.694	0.137	-6.627	9.975	0.026	0.111	-17.609	31.514	0.109	0.028	
0.93	-25.388	19.546	-0.046	-7.910	5.039	-0.023	-0.023	-21.019	15.919	-0.040	-0.006	
0.91	-28.896	2.845	-0.205	-9.003	0.733	-0.065	-0.140	-23.923	2.317	-0.170	-0.035	
0.89	-31.984	-12.169	-0.348	-9.965	-3.137	-0.103	-0.244	-26.480	-9.911	-0.286	-0.061	
0.87	-34.758	-25.919	-0.478	-10.830	-6.682	-0.138	-0.340	-28.776	-21.110	-0.393	-0.085	
0.85	-37.284	-38.675	-0.598	-11.617	-9.970	-0.170	-0.428	-30.867	-31.499	-0.491	-0.107	
0.83	-39.607	-50.615	-0.710	-12.340	-13.048	-0.200	-0.510	-32.790	-41.224	-0.583	-0.128	
0.81	-41.759	-61.870	-0.816	-13.011	-15.949	-0.228	-0.588	-34.572	-50.390	-0.669	-0.147	
0.79	-43.764	-72.536	-0.916	-13.636	-18.699	-0.255	-0.661	-36.232	-59.077	-0.750	-0.165	
0.77	-45.641	-82.686	-1.010	-14.220	-21.315	-0.280	-0.731	-37.786	-67.343	-0.828	-0.183	
0.75	-47.404	-92.379	-1.101	-14.770	-23.814	-0.304	-0.797	-39.246	-75.238	-0.901	-0.199	
0.73	-49.065	-101.662	-1.187	-15.287	-26.207	-0.327	-0.860	-40.621	-82.798	-0.972	-0.215	
0.7	-51.386	-114.899	-1.309	-16.010	-29.619	-0.359	-0.950	-42.542	-93.579	-1.072	-0.237	