

**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

Ing. Lukáš Radil

**ELIMINACE DISKONTINUITY DODÁVKY ELEKTRICKÉ
ENERGIE Z OBNOVITELNÝCH ZDROJŮ**

**ELIMINATION OF DISCONTINUITY SUPPLY OF ELECTRIC
ENERGY FROM RENEWABLE ENERGY SOURCES**

ZKRÁCENÁ VERZE Ph.D. THESIS

Obor:	Silnoprúdová elektrotechnika a elektroenergetika
Školitel:	doc. Ing. Petr Mastný, Ph.D.
Oponenti:	doc. Ing. Radomír Goňo, Ph. D. doc. Ing. Peter Braciník, Ph.D.
Datum obhajoby:	19.12.2013

Klíčová slova

Akumulátor, Model akumulátoru, Akumulační systémy, Akumulační soustavy, Ekonomika provozu, Autonomní systémy.

Keywords

Accumulator, Storage Battery, Battery Model, Electric energy storage, Storage systems and Economic of operation, Autonomous Systems.

Místo uložení práce

Práce je k dispozici: ve fakultní knihovně FEKT VUT v Brně, Technická 12, 602 00 Brno

Obsah

1 Úvod	5
2 Současný stav	5
2.1 Aktuální situace ve světě	6
3 Cíle disertační práce	6
3.1 Aspekty a podmínky nasazení akumulčních prostředků	7
4 Stav řešení	8
4.1 Představení modelovacího nástroje - software	8
5 Řešení problematiky – modelování	9
5.1 Model baterie	9
5.2 Základní charakteristiky	10
5.2.1 Elektrochemický popis	10
5.2.2 Standardní potenciál z pohledu termodynamiky	11
5.2.3 Elektrochemický model	12
5.2.4 Elektronová výměna	13
5.2.5 Vstupní a výstupní koncentrace	13
5.2.6 Protonová výměna	14
5.3 Schéma modelu	14
6 Výsledky ze simulace	16
6.1 Zhodnocení modelu	16
7 Sítě Smart Grid	17
7.1 Definice Smart Grid	17
7.1.1 Vyhodnocení modelu	20
8 Závěr	21
8.1 Shrnutí základních poznatků	21
8.2 Závěr z předložených aspektů a podmínek použití akumulčních prostředků v sítích	22
8.3 Doporučení k nasazení zásobníků elektrické energie	23
8.4 Výrobní bloky	24
8.5 Cíle disertační práce a jejich splnění	24
8.5.1 Seznámení se s momentálními způsoby akumulace elektřiny	24
8.5.2 Akumulace za využití tepelných soustav	24
8.5.3 Návrh matematického modelu	24
8.5.4 Sestavení funkčního modelu	24
8.5.5 Provedení experimentálního měření	25
8.6 Přínos práce	25
Curriculum Vitae	27
Literatura	28
Vlastní publikace	29
Abstract	30

1 Úvod

Pojem akumulace elektrické energie lze definovat jako opakovanou možnost uchování energie. Potřeba akumulace elektrické energie je předmětem výzkumu již od počátku objevu elektrického proudu. Problematika řešení eliminace diskontinuity dodávky elektrické energie z obnovitelných zdrojů vychází z principů jednotlivých alternativních zdrojů energie a problémy spojenými s časově proměnlivým výkonem těchto zdrojů.

V současné době je akumulace a hlavně technologie akumulačních prostředků ve fázi podrobného výzkumu. Tato práce se zabývá zejména analýzou akumulačních metod v návaznosti na malé autonomní systémy a také na problematiku akumulace v elektrických sítích (ES).

Můžeme říci, že dnes díky moderní spínací technice není problém převést stejnosměrné napětí (DC) na střídavé (AC), které je používáno v ES a naopak. Práce se tedy nezabývá připojením těchto akumulačních prvků přes měniče do sítě, ale přispívá k pochopení důležitých parametrů akumulace, zejména s ohledem na využití i mimo prostou akumulaci elektrické energie ze stochastických zdrojů, jakými jsou fotovoltaické zdroje (FVE) nebo větrné (VTE), obecně známé pod zkratkou OZE – Obnovitelné zdroje energie.

2 Současný stav

Podle několika nezávislých institucí (IEA) poroste spotřeba energií do roku 2030 o 1,7 % ročně. Tyto výhledy jsou silně závislé na aktuálním ekonomickém vývoji, nicméně spotřeba energií se zvyšuje se stoupajícím počtem obyvatel. Otázka řešení může spočívat ve větším až masivní výstavbě zdrojů elektrické energie. Podstatnou roli hrají obnovitelné zdroje energie, které mají význam i environmentální – nízký vliv na znečištění životního prostředí. Obecně je snižování míry využívání neobnovitelných zdrojů a naopak využívání obnovitelných v míře jejich přirozené regenerace, základní podmínkou udržitelného rozvoje.

Podle Ministerstva životního prostředí jsou jediným, dlouhodobě udržitelným energetickým zdrojem obnovitelné zdroje. Jakkoliv je jejich význam podceňován, je zapotřebí dlouhodobě orientovat energetiku právě tímto směrem. Téměř nevyužitý potenciál obnovitelných zdrojů, především biomasy pro výrobu tepla i elektřiny, energie větru a slunce. Obecně je snižování míry využívání neobnovitelných přírodních zdrojů a využívání obnovitelných zdrojů v míře jejich přirozené regenerace základní podmínkou udržitelného rozvoje.

Stochastický vliv OZE na elektrizační soustavu je v dnešní době již velmi citelný, ať už se jedná o fotovoltaické elektrárny, nebo větrné elektrárny. V Evropě se začínají prosazovat obnovitelné zdroje energie ještě ve větší míře než v České republice. Například v Německu se do roku 2020 předpokládá u větrných elektráren instalovaný výkon zdrojů na úrovni 46 000 MW (!) a fotovoltaických 52 000 MW (!). S tímto scénářem pracuje OTE, při návrhu technologických opatření. Jenom v Německu je instalovaný výkon v současné době na úrovni 28000 MW. Vzhledem k prudkému rozvoji fotovoltaických elektráren (FVE) v České republice se do popředí dostala otázka jejich začleňování do elektrizační soustavy (ES). V souvislosti s dotačními programy ČR a EU je u nás značné množství FV elektráren s výkony řádu jednotek až desítek megawattů. Dle posledního údaje (červen 2013) je v ČR instalovaný výkon FVE 2128 MW a větrných elektráren (VTE) 261,1 MW (celkový instalovaný výkon v ČR je 20 568,7 MW). Nenaplnil se tedy předpoklad, který byl v roce 2009, kdy se předběžně hlásilo o připojení do sítě téměř 8560 MW u FVE a 3665 MW u VTE.

Připojení zdrojů OZE nad 100 kW instalovaného výkonu je ve většině případů řešeno na napěťové úrovni 22 kV. Pod 100 kW se připojení řeší na hladině nízkého napětí, tedy 400 V. Vezmeme-li v potaz, že se jedná o zdroje s proměnlivým výkonem bez možnosti výrazného centralizovaného řízení, nastává problém. Dobře navržená baterie dokáže vykrývat náhlé poklesy nebo přebytky elektrické energie. Funkční technologie akumulace energie je dalším důležitým prvkem k vybudování

tzv. Smart Grids. Ať už se bude jednat o bateriový pohon automobilů nebo o nasazení inteligentních zdrojů a spotřebičů v rámci rozvodné sítě. Jako příklad této aplikace můžeme uvést projekt rozptýlené elektrárny. Ta se skládá z malých decentralizovaných výroben, které jsou propojeny a v reálném čase komunikují mezi sebou.

Energetická politika EU je nastavena na částečnou energetickou soběstačnost členských států. Do roku 2020 je v plánu pokrývat 20 % spotřeby elektrické energie obnovitelnými zdroji.¹ Bez jakékoliv akumulace není reálně možné tento výhled uskutečnit. V souvislosti s akumulací energie je také možné mluvit o snižování energetické nezávislosti a emisních částic, jakými jsou: CO₂, SO₂, popílek a další znečišťující látky. Podle [9] Česká republika spotřebuje ročně 1850 PJ energie. Jakákoliv úspora je tedy žádoucí.

2.1 Aktuální situace ve světě

V současné době je situace v plánování nadnárodních energetických koncepcí silně ovlivněna dvěma faktory. Prvním z nich je veřejné mínění a druhým případné poruchy technologických zařízení. Lze však říci, že oba pohledy jsou názorově sjednoceny na požadavku většího podílu obnovitelných zdrojů energie na celkovém mixu zdrojů (Německo) nebo přímo se vzdát fosilních paliv (Rakousko). Další sjednocující vazbou je názor na efektivní využití stávajících zdrojů (fosilních).

Konvenční zdroje² jsou využívány zejména z důvodu nízké ceny produkované elektřiny nebo rychlých záskoků.

V Evropě je snaha o kompletní reformu energetiky. Z celkového podílu 95 % se má využívání klasických zdrojů snížit na hodnotu (15 – 20) %. Výhledově (roky 2070 a více) by mělo dojít k úplnému odstavení těchto zdrojů.

Ve světě je využívání zdrojů založených pouze na přírodních principech³ silně omezeno na malá území. V naprosté většině to jsou odlehlé lokace (ostrovy) nebo tam, kde není možné zásobování obyvatelstva jinou cestou. Pro srovnání účinnosti akumulačního média se většinou uvažuje nahrazení původního zdroje, popřípadě jeho spotřeby pohonných hmot před instalací akumulátoru a po něm.

3 Cíle disertační práce

Hlavním cílem disertační práce je vytvořit model akumulace elektrické energie. Jedná se o aktuální problematiku v distribuci a výrobě elektrické energie. K vyřešení tohoto cíle je nutné splnit několik dílčích problémů:

1. podrobně analyzovat současný stav dostupných technologií pro akumulaci elektrické energie a vybrat technologie vhodné pro akumulaci v elektroenergetice,
2. definovat možnosti realizace akumulačních soustav na bázi tepelné techniky vhodných ve spojení s konvenční energetikou a elektrárenstvím,
3. navrhnout matematický model a vybrat vhodné výpočetní prostředí pro následné výpočty,
4. sestavit funkční vzorek akumulačního systému, na kterém bude možné matematický model ověřit. Aplikace by měla pokrýt spolupráci více OZE ve vykrývání výkonových špiček,
5. provést experimentální ověření vytvořeného modelu na vytvořeném laboratorním systému.

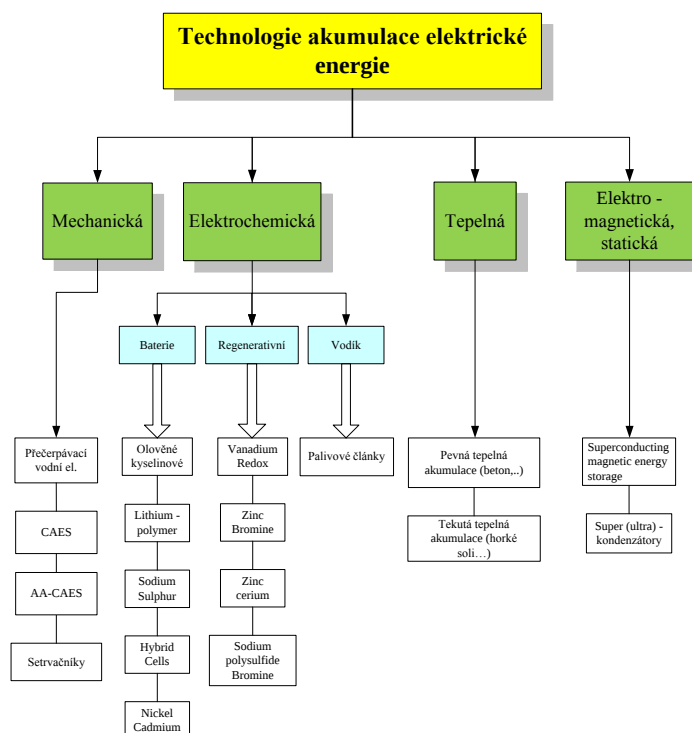
¹ Tuto hodnotu nelze zaměňovat s cílem 13 % dle Směrnice 2009/28/ES, která stanovuje závazné hodnoty podílu energie z OZE na hrubé konečné spotřebě všech energií (elektřina, teplo, doprava) v roce 2020.

² Konvenčním nebo klasickým zdrojem je myšlen zdroj, který využívá ke svému provozu fosilních nebo jaderných paliv

³ Vodní, sluneční, větrné, přílivové, příbojové, geotermální, využívající mořské proudy

3.1 Aspekty a podmínky nasazení akumulčních prostředků

1. Akumulace elektrické energie, potažmo zásobníky elektrické energie lze využít pro obnovitelné zdroje elektrické energie jako jejich doplněk pro zrovnoměnění dodávky elektřiny do ES.
2. Zásobníky lze použít i jako *nutný* doplněk k obnovitelným zdrojům elektrické energie, určený legislativou a připojovacími podmínkami provozovatelů ES.
3. Akumulací elektrické energie prostřednictvím akumulátorů lze docílit lepší regulovatelnosti ES za předpokladu, že budou akceptovány vlastnosti zásobníků a budou utvořeny podmínky pro jejich použití v rámci decentralizovaných zdrojů a regulace na úrovni distribuce.
4. Akumulátory lze použít pro zlepšení kvality elektrické energie a také k zálohování spotřeby první kategorie.
5. Pro záložní zdroje velkých výkonů je vhodné využití akumulátorů, kde lze počítat se značnými úsporami nákladů na provoz současných záložních jednotek (myšleno např. ztrátové vytápění na provozní teplotu dieselgenerátorů). Typickými zdroji jsou například jaderné elektrárny s dieselgenerátory pro případné výpadky napájení (časový koeficient v tomto případě je nutné velmi dobře zvážit a následně použít mobilní záložní jednotky).
6. Akumulační prostředky jsou nezbytné pro fungování tzv. „chytrých“ sítí (obecně označovaných jako Smart Grid). Stejně jako v sítích lokálních (Micro Grid).



Obr. 2.1: Současné možnosti akumulace elektrické energie

4 Stav řešení

Vlastní model baterie je simulován v prostředí Modelica[®], respektive v WolframSystemModeler[™], který je na Modelica[®] založen.

4.1 Představení modelovacího nástroje - software

Modelica[®] je primárně modelovacím jazykem, který umožňuje specifikovat matematické modely v přirozeném nebo umělém prostředí pro účely počítačové simulace dynamických systémů, které mají vlastnosti vyvíjející se v čase. Modelica[®] je také objektově orientovaný na rovnicích založený simulační software (jazyk), orientovaný směrem k počítačové analýze s komplexními požadavky vyžadující vysoký výkon dané simulace [7].

Modelica[®] se vyznačuje akauzálním systémem modelace. Na rozdíl například od Matlabu Simulink[®] firmy MathWorks[®], který je primárně kauzální, tedy kontroluje metodiku výpočtu. Vlastně se jedná o grafické implementování rovnic a postupů výpočtů – nemění se kauzalita. Programování v Modelica[®] vystihuje především fyzikální princip s tím, že neřešíme metodu výpočtu [16].

Akauzální modelování je deklarativní styl modelování, jehož význam je v modelování na základě rovnic namísto příkazu přiřazení. Rovnice nejsou zadány, pouze jsou zadány proměnné na vstupu a výstupu. Příkazy přiřazení proměnných na levé straně jsou vždy výstupní (výsledky) a proměnné na pravé straně jsou vždy vstupní. To znamená, že kauzalita rovnic založené na modelech není určena a ustálí se pouze tehdy, když se řeší příslušné rovnicové systémy. Tento systém se nazývá non-kauzálním (akauzálním) modelováním. Pojem fyzikální modelování odráží skutečnost, že akauzální modelování se velmi dobře hodí pro zastupování fyzické struktury modelovaných systémů. Hlavní výhodou je to, že modelování akauzálním řešením přizpůsobí tok dat kontextu, ve kterém se vypočítává řešení. Tok dat kontextu je definován tak, že proměnné, ve kterých jsou potřebné výstupy, jsou externí vstupy do simulovaného systému. Akauzální třída knihoven v Modelice[®] umožňuje více než jedno použití tradičních tříd, obsahující příkazy přiřazení, ve kterých je stanovena vstupně-výstupní kauzalita.

Pokud porovnáme vlastnosti všeobecně známého Matlab/Simulink[®] s jazykem Modelica[®], můžeme říci, že [10]:

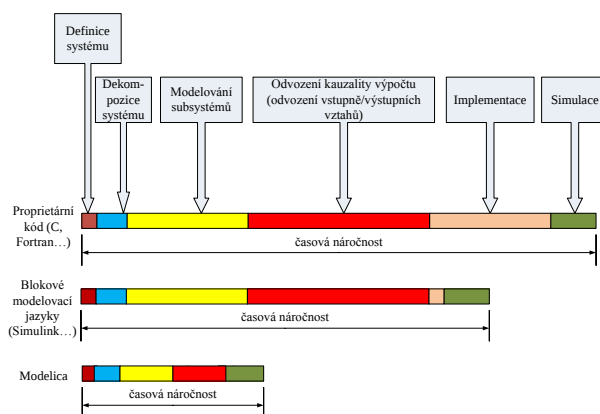
- modelovaná realita mnohem více vystihuje podstatu modelu, simulační modely jsou méně náchylné k chybám a jsou lehce čitelné,
- Modelica[®] umožňuje stavět a ladit modely, které je možné hierarchicky stavět s použitím knihoven znovupoužitelných prvků,
- Simulink[®] je standard firmy Mathworks, ale Modelica[®] je normalizovaný otevřený programovací jazyk, díky kterému mohou vznikat nezávislé a velmi specifické knihovny,
- v Modelica[®] lze úspěšně kombinovat jak kauzální, tak akauzální programování, na rozdíl od Simulinku[®]. Vývojový pracovník nemusí řešit jednotlivé smyčky, ty řeší vlastní prostředí Modelica[®].

V Modelica[®] propojujeme mezi sebou jednotlivé fyzikální bloky, dochází ke spojení soustav rovnic. Nekontrolujeme metodiku jejich výpočtu jako například v Simulinku[®]. Výpočet je řešen samotným programem – solverem. Jazyk Modelica[®], v různých grafických nadstavbách (SystemModeler[™], OpenModelica[®], Jmodelica[®], Dymola[®] aj.), je stále více uplatňován v průmyslových aplikacích.

Základní vlastnosti Modelica[®] jsou:

- Modelica[®] je především založena na rovnicích místo na přiřazovacích příkazech.

- Modelica® má multidoménovou modelovací schopnost. Modely vytvořené v systému obsahují komponenty od fyzikálních přes elektrické, mechanické, termodynamické, hydraulické až po biofyzikální. Umožňuje také jejich vzájemné propojení a vytvoření jednoho komplexního modelu.
- Modelica® reprezentuje objektově orientovaný jazyk obecně třídního konceptu, který obsahuje třídy obecně známé jako šablony v C# a obecné podtypy v jednoduchém jazykovém konceptu. Tyto možnosti jsou opětovně využity v evoluci modelů.
- Modelica® má silné softwarové komponentní modely s konstrukcí pro vytvoření a spojování jednotlivých částí modelu.



Obr. 4.1: Princip jazyku Modelica® s porovnáním s ostatními typy modelovacích jazyků, vytvořeno podle [7]

Algoritmus programu je rozdělen do několika kroků, jak ukazuje mimo jiné obrázek ??:

1. Flatenizace modelu - celková konstrukce a hierarchie modelu je nahrazena jedinou soustavou rovnic
2. Vytvoření abstraktního syntaktického stromu modelu
3. Analýza – algebraická manipulace – probíhá zjednodušení rovnic
4. Generování kódu v C (C#), spojení se solverem → simulace

5 Řešení problematiky – modelování

5.1 Model baterie

Model, který je uveden níže reprezentuje průtokový akumulátor na bázi vanadu, tak zvanou VRB průtočnou baterii.

Pro modelování byl vybrán akumulátor na principu VRB ze dvou důvodů:

- Jedná se o představitele velké akumulační kapacity s výbornými fyzikálními vlastnostmi pro energetiku.
- Model lze evaluovat na skutečném vzorku (5 kW, 20 kWh), který je k dispozici.

Baterie můžeme modelovat třemi způsoby, a to:

- elektricky,
- matematicky,
- fyzikálně-chemicky – za předpokladu akumulace prostřednictvím chemické vazby.

5.2 Základní charakteristiky

Pro matematickou modelaci jsou důležité veličiny jako SOC (State of Charge - stupeň nabití), parazitní kapacity a odpory jednotlivých článků a také parazitní odpory, které vznikají na přechodech membrán a elektrolytu.

Rovnice 5.1 vyjadřuje závislost stupně nabití (SOC) na velikost průchozího proudu obvodem. Ten je dán také parametrem η , který symbolizuje účinnost (zahrnuje parazitní jevy). Baterie, popřípadě akumulátor je velice tvrdým zdrojem proudu, proto se musíme zaměřit na napětí, které určuje stupeň nabití a vybití. Tuto vlastnost popisuje rovnice 5.2, která současně reprezentuje vlastnosti, které se podílejí na snížení kapacity (zejména teplota)

$$\frac{dSOC}{dt} = \eta I \quad (5.1)$$

$$U_{OCV} = U_{norm} + \alpha \frac{RT}{F} \ln \left(\frac{SOC}{C_{norm} - SOC} \right) \quad (V), \quad (5.2)$$

kde

U_{OCV} ... je napětí otevřeného obvodu

R ... je plynová konstanta ($J.K^{-1}.mol^{-1}$)

T ... je termodynamická teplota (K)

F ... je Faradayova konstanta ($C.mol^{-1}$)

C_{norm} ... je normovaná kapacita (1)

Jak bylo uvedeno, lze model vytvářet třemi různými možnostmi. Z důvodu nízkých praktických zkušeností s provozem systému VRB (nutná evaluace), byl model vytvořen na principu elektrických vlastností článku. Přesto pro podrobnější představu při elektrochemických dějích během nabíjení a vybíjení, je důležité uvést formulace, které nám dovolí studovat vlastnosti akumulace prostřednictvím vanadu skrze elektrochemický model.

Následující popis je převzatý z práce [3], ve které jsou vlastnosti VRB akumulátorů popsány a ze kterých se musí vycházet i pro model tvořený v Modelice.^{4 5}

5.2.1 Elektrochemický popis

Pro správné pochopení dějů, které se odehrávají v akumulátoru je nezbytné znát elektrochemické pochody.

Rovnovážný potenciál Napětí článku U_{stack} závisí na rovnovážném napětí U_{eq} a na vnitřních ztrátách v systému U_{loos} . Nebo-li:

$$U_{stack} = U_{eq}(t) - U_{loos}(t) \quad (V), \quad (5.3)$$

Rovnovážné napětí U_{eq} koresponduje se sumou rovnovážných potenciálů E z individuálního článku složeného do souboru. Potenciál je dán Nernstovou (někdy označována také jako Nernstov-Petersov) rovnicí a závisí na vanadiovém koncentraci a na protonové koncentraci.

$$E = E^{\circ} + \frac{RT}{F} \ln \left[\left(\frac{c_{VO_2^+} \cdot c_{H^+}^2}{c_{VO^{2+}}} \right) \left(\frac{c_{V^{2+}}}{c_{V^{3+}}} \right) \right] \quad (V), \quad (5.4)$$

kde

c_i ... je koncentrace typu i

⁴Více informací lze nalézt v několika článcích, ze kterých cituje i [3], konkrétně v [13–15]

⁵Kompletní základy a podstatné veličiny a jejich odvození lze nalézt také v [5]

E° ... je standardní potenciál .

Někdy je také Nernstova rovnice vyjádřena vztahem:

$$E = E^\circ - \frac{0,058}{z} \log \left[\left(\frac{c_{VO_2^+} \cdot c_{H^+}^2}{c_{VO^{2+}}} \right) \left(\frac{c_{V^{2+}}}{c_{V^{3+}}} \right) \right] \quad (V) \quad (5.5)$$

kde

z ... je počet elektronových výměn v roztoku (1)

Obecný tvar Nernstovy rovnice má tvar:

$$E = E^\circ + \frac{RT}{zF} \ln a \quad (5.6)$$

kde

a ... je aktivita určující elektrodový potenciál ($\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$)

Hodnota E° závisí na volbě jednotek aktivity a , protože na této volbě závisí standardní členy μ° . Obvykle se udává E° v jednotkách V nebo mV při aktivitě $1 \text{ mol} \cdot \text{dm}^3$ [5]

Závislost teplotní reakce elektromotorické síly lze získat prostřednictvím mocninné řady, jež má koeficienty určeny experimentálně. Rovnice vyjadřující tento děj je (prostřednictvím Gibbsovy-Helmholtzovy rovnice):

$$-nFE = \Delta H - nFT \left(\frac{\partial E}{\partial T} \right)_p \quad (5.7)$$

5.2.2 Standardní potenciál z pohledu termodynamiky

Standardní potenciál E° vyjadřuje ideální stav, při standardních podmínkách baterie. Jsou jimi:

- vanadiové druhy při koncentraci 1 M,
- koeficienty aktivity γ_i jsou rovné jedné,
- teplotě 25 °C a tlaku 100 kPa.

Tabulka 5.1: Provozní parametry VRB článku [3]

Název proměnné	Provozní parametry	Jednotka
I	Elektrický proud	A
$c_{V^{2+}}$	V^{2+} Anolytická koncentrace	$\text{mol} \cdot \text{l}^{-1}$
$c_{V^{3+}}$	V^{3+} Anolytická koncentrace	$\text{mol} \cdot \text{l}^{-1}$
$c_{V^{4+}}$	V^{4+} Katolytická koncentrace	$\text{mol} \cdot \text{l}^{-1}$
$c_{V^{5+}}$	V^{5+} Katolytická koncentrace	$\text{mol} \cdot \text{l}^{-1}$
c_{H^+}	Protonová koncentrace v katolytu	$\text{mol} \cdot \text{l}^{-1}$
T	Teplota článku	K
Q	Průtok elektrolytu	$\text{l} \cdot \text{s}^{-1}$

Standardní potenciál vystupuje v Nernstově rovnici (5.4) a je proto velmi důležitý. Vyjadřuje reakční potenciál při standardních podmínkách. Druhá část v rovnici popisuje odchylky od rovnovážných (standardních) podmínek. Obě části jsou důležité pro určení napětí článku právě při různých podmínkách [3].

Standardní potenciál E° můžeme nalézt v termodynamickém principu. A to z Gibbsovy volné entalpie ΔG , zákona zachování energie a empirických koeficientech (většinou je lze najít v elektrochemických tabulkách). V našem případě je zde představována standardní Gibbsova volná entalpie

reakce (označena jako ΔG°), která reprezentuje změny volné energie, jenž doprovází vznik 1 M⁶ roztoku z jejich vanadiových prvků ve standardním stavu, tedy při již zmiňovaných 25 °C a tlaku 100 kPa a 1 M [3].

$$\Delta G^\circ = \Delta H_r^\circ - T\Delta S_r^\circ \quad (\text{kJ.mol}^{-1}). \quad (5.8)$$

Jednotlivé členy rovnice lze popsat tak, že standardní reakční entalpie ΔH_r° je rozdílem molární formace entalpie mezi produkty $\Delta H_{f, \text{produkt}}^\circ$ a činidly $\Delta H_{f, \text{cinidlo}}^\circ$ (rovnice 5.9) [3], a standardní reakční entropie ΔS_r° je rozdílem molární formace entropie mezi produkty $\Delta S_{f, \text{produkt}}^\circ$ a činidly $\Delta S_{f, \text{cinidlo}}^\circ$ (rovnice 5.10).

$$\Delta H_r^\circ = \sum_{\text{produkt}} \Delta H_{f, \text{produkt}}^\circ - \sum_{\text{cinidlo}} \Delta H_{f, \text{cinidlo}}^\circ \quad (\text{kJ.mol}^{-1}). \quad (5.9)$$

$$\Delta S_r^\circ = \sum_{\text{produkt}} \Delta S_{f, \text{produkt}}^\circ - \sum_{\text{cinidlo}} \Delta S_{f, \text{cinidlo}}^\circ \quad (\text{J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}). \quad (5.10)$$

Pokud budeme uvažovat termodynamická data z tabulky 5.2 a dosadíme je do rovnice 5.9, bude výsledná entalpie [3]:

$$\Delta H_r^\circ = \Delta H_{f, \text{VO}^{2+}}^\circ + \Delta H_{f, \text{V}^{3+}}^\circ + \Delta H_{f, \text{H}_2\text{O}}^\circ - \Delta H_{f, \text{V}^{2+}}^\circ - \Delta H_{f, \text{VO}_2^+}^\circ - 2\Delta H_{f, \text{H}^+}^\circ = -155,6 \text{ kJmol}^{-1}.$$

A podobně s rovnicí 5.10 získáme entropii [3]:

$$\Delta S_r^\circ = \Delta S_{f, \text{VO}^{2+}}^\circ + \Delta S_{f, \text{V}^{3+}}^\circ + \Delta S_{f, \text{H}_2\text{O}}^\circ - \Delta S_{f, \text{V}^{2+}}^\circ - \Delta S_{f, \text{VO}_2^+}^\circ - 2\Delta S_{f, \text{H}^+}^\circ = -121,7 \text{ Jmol}^{-1}\text{K}^{-1}.$$

Tabulka 5.2: Termodynamická data pro vybrané vanadiové sloučeniny při 295,15 K. Hodnoty označeny hvězdičkou jsou odhadovány. [1, 3]

Vzorec	Stav	ΔH_f° (kJ.mol ⁻¹)	ΔG_f° (kJ.mol ⁻¹)	ΔS_f° (kJ.mol ⁻¹)
V ²⁺	vodný roztok	-226,0*	-218,0	-130,0*
V ³⁺	vodný roztok	-259,0*	-251,3	230,0*
VO ²⁺	vodný roztok	-486,6	-446,4	-133,9
VO ₂ ⁺	vodný roztok	-649,8	-587,0	-42,3
H ₂ O	vodný roztok	-285,8	-237,2	69,9
H ⁺	vodný roztok	0,0	0,0	0,0

Zachování energie se vztahuje ke změně volné energie vyplývající z transferu n molů elektronů do difference potenciálu E :

$$\Delta G = -nFE \quad (\text{Jmol}^{-1}). \quad (5.11)$$

Pokud budeme uvažovat předchozí vztahy a provedeme dosazení, lze určit výsledný potenciál:

$$E^\circ = -\frac{\Delta G^\circ}{nF} = -\frac{\Delta H_r^\circ - T\Delta S_r^\circ}{nF} \quad (\text{V}). \quad (5.12)$$

Z výše zmíněných termodynamických principů a vztahů lze vypočítat standardní potenciál, který je **1,23 V** při 25°C.

5.2.3 Elektrochemický model

Hlavní elektrochemické vztahy byly představeny v minulé části. Řešili jsme článek především z pohledu rovnovážných napětí. Následující kapitola by měla naopak představit článek z pohledu elek-

⁶1 M se rovná standardní molaritě, c° (mol.l⁻¹)

trochemického a popsat chování článku pomocí vanadiových koncentrací během provozu VRB.

Pokud si představíme reakci, zjistíme, že vanadiové ionty jsou přeměňovány a jsou vytvářeny nebo spotřebovávány protony H^+ . Na základě toho se musí v elektrolytu koncentrace měnit v závislosti na povelu článku.

Pro příklad můžeme uvést chod článku při nabíjení: V^{2+} a VO_2^+ jsou produkovány a jejich koncentrace vzrůstá a naopak V^{3+} a VO^{2+} jsou spotřebovávány a jejich koncentrace klesá. Tento proces je reverzní, když je článek vybíjen. Tabulka 5.3 ilustruje dané stavy [3].

Tabulka 5.3: Rozdíl vanadiových iontů a jejich odpovídajících solí, koncentrace roztoku při nabíjení a vybíjení a typ elektrolytu, ve kterém jsou rozpuštěny [3]

	Sůl	Nabíjení	Vybíjení	Typ elektrolytu
V^{2+}	VSO_4	↑	↓	Anolyt
V^{3+}	0,5 $V_2(SO_4)_3$	↓	↑	Anolyt
V^{4+} nebo VO^{2+}	$VOSO_4$	↓	↑	Katolyt
V^{5+} nebo VO_2^+	0,5 $(VO_2)_2SO_4$	↑	↓	Katolyt

5.2.4 Elektronová výměna

Změny koncentrace jsou úměrné rychlosti reakce. Elektron se vždy podílí na redoxní reakci. To znamená, že na koncentraci má vliv elektrický proud. Proto také rychlost reakce závisí na změně proudu, který teče přes každý článek:

$$Q_c = n_e \cdot e = \int i(t) dt \quad (C), \quad (5.13)$$

kde

$Q_c \dots$ je náboj (C)

$n_e^- \dots$ je počet elektronů (1)

$e \dots$ je elementární náboj (C). Počet elektronů n_e^- zapojených v proudovém obvodu je:

$$n_{e^-} = \frac{1}{eN_A} = \int i(t) dt \quad (\text{mol}), \quad (5.14)$$

kde

$N_A \dots$ je Avogadrova konstanta (mol^{-1}). Pro molární průtok pak můžeme definovat:

$$\dot{N}_{e^-}(t) = \frac{1}{eN_A} i(t) \quad (\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}), \quad (5.15)$$

Elektron se uvolní oxidací iontů vanadu, přechází skrze elektrody a je zachycen na redukci dalšího vanadiového iontu v opačné polovině článku. V případě několika článků, se elektrony pohybují přes bipolární elektrody v přilehlém článku. Jeden elektron tedy přechází skrze externí obvod, buňkami a následně způsobí oxidačně-redukční reakci. Proto lze pro zásobník určit molární průtok elektronů $\dot{N}_{e_{tot}^-}$, pouhým vynásobením podle počtu článků.

$$\dot{N}_{e_{tot}^-}(t) = \frac{N_{cell}}{eN_A} i(t) = \frac{N_{cell}}{F} i(t) \quad (\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}), \quad (5.16)$$

5.2.5 Vstupní a výstupní koncentrace

Z výše popsaného plyne, že změna vanadiové koncentrace se může lišit, pokud je baterie v provozu. Z tohoto důvodu není koncentrace stejná v celém objemu. Ve skutečnosti jsou čtyři různé koncentrace vanadu – koncentrace v nádrži c_{nadrz} , na vstupu do článku c_{in} , uprostřed c_{cell} a na konci c_{out} . Jelikož jsou nádrže mnohem větší, než objem uvnitř spojovacích potrubí, lze považovat tento objem

za homogenní. Proto vstupní koncentrace odpovídá koncentraci v nádrži – $c_{in} = c_{nadrz}$. c_{nadrz} re-flektuje stav koncentrace v nádrži z předchozího provozu. Ve skutečnosti c_{nadrz} je úměrná množství vanadu, který byl transformován v článcích – tato hodnota odpovídá množství elektronů v reakci. Proto by měla koncentrace c_{nadrz} definována v závislosti na koncentraci počáteční $c_{pocatecni}$, objemu zásobníku V_{nadrz} a celkovém molárním průtoku elektronů $\dot{N}_{e_{tot}^-}$.

$$\begin{aligned} c_{in_i}(t) &= c_{nadrz_i}(t) = c_{nadrz_i}^{pocatecni} + \frac{1}{V_{nadrz}} \int b \dot{N}_{e^-}(t) dt = \\ &= c_{nadrz_i}^{pocatecni} + \frac{1}{V_{nadrz}} \int \frac{b}{F} i(t) dt \quad (\text{mol.l}^{-1}). \end{aligned} \quad (5.17)$$

kde

$b \dots$ je faktor reprezentující přímou reakci v souladu s tabulkou 5.3:

$$b = \begin{cases} -1 & \text{pro } V^{2+} \text{ a } V^{5+} \text{ ionty} \\ 1 & \text{pro } V^{3+} \text{ a } V^{4+} \text{ ionty} \end{cases} \quad (1). \quad (5.18)$$

Samotný popis výstupní koncentrace je poměrně obtížné, protože závisí na průtoku elektrolytu, délce elektrolytového vedení a na proudu i . Zjistit přesnou koncentraci uvnitř článku je nemožné, a proto se autoři [3] domnívají, že reaguje okamžitě na změny provozních podmínek. Proto dospěli k této rovnici, kde c_{out} odpovídá molárnímu průtoku $\dot{N}_{e_{tot}^-}$, průtoku elektrolytu Q a vstupní koncentrací c_{in} :

$$c_{out_i}(t) = c_{ini_i}(t) + b \frac{\dot{N}_{e_{tot}^-}(t)}{Q(t)} = c_{ini_i}(t) + \frac{b N_{cell}}{F} \frac{i(t)}{Q(t)} \quad (\text{mol.l}^{-1}), \quad (5.19)$$

kde

$c_i \dots$ je koncentrace rozdílných vanadiových iontů (mol.l^{-1})

$Q(t) \dots$ je průtok elektrolytu (l.s^{-1}).

Jestliže budeme předpokládat jakýsi ustálený stav, kdy veškeré podmínky se zdají být konstantní (proud, průtok elektrolytu), budou výsledkem přesné koncentrace. Pro výpočet Nernstovy rovnice, ale uděláme výpočet střední hodnoty koncentrace v článku:

$$c_{cell_i}(t) = \frac{c_{ini_i}(t) + c_{out_i}(t)}{2} \quad (\text{mol.l}^{-1}). \quad (5.20)$$

5.2.6 Protonová výměna

Pro uvědomění si, jak probíhá protonová výměna uvnitř článku, lze využít následující diagram. Jedná se o výměnu protonů H^+ a iontů SO_4^{2-} . Zejména SO_4^{2-} jsou částečně zastoupeny v rovnicích popisujících děj, ale sami se aktivně nepodílejí na reakci. Ale jsou důležité pro respektování zákona o zachování hmoty a náboje v obou elektrolytech. Z obrázku 5.1 je dobře patrné, jak se protonová koncentrace c_H^+ mění a proč protony přechází přes membránu k vyrovnávání náboje.

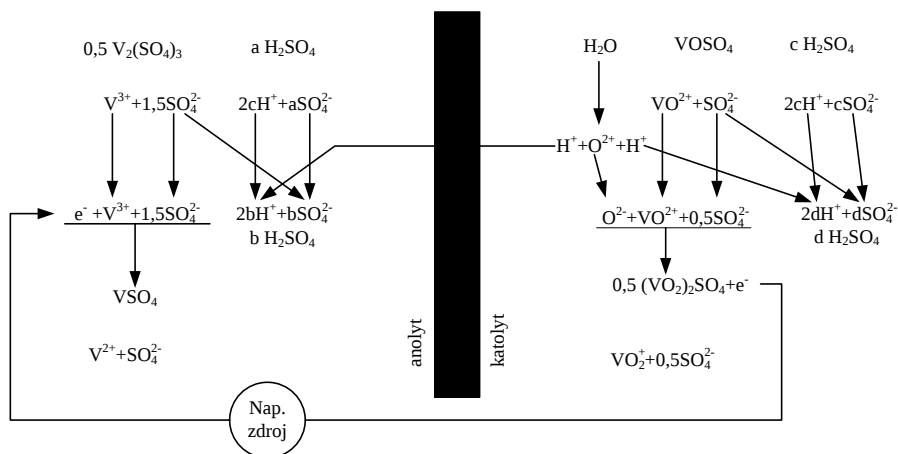
$$c_H^+ = c_{H,vybijeni}^+ + c_{VO^{2+}} \quad (\text{M}), \quad (5.21)$$

kde

$c_{H,vybijeni}^+ \dots$ je protonová koncentrace, když je elektrolyt kompletně vybitý.

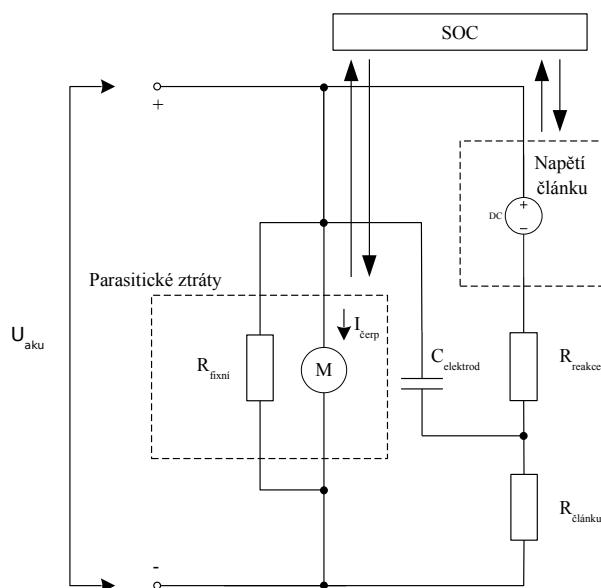
5.3 Schéma modelu

Schéma modelu je uvedeno na následujících obrázcích. Model je vytvořen v prostředí Modelica®. Jedná se o implementaci vybíjecích a nabíjecích závislostí. Nejedná se čistě o model založený



Obr. 5.1: Schéma chemických dějů při nabíjení [3] – upraveno autorem

na elektrochemickém principu, ale již na jeho skutečných vlastnostech. Během řešení a návrhu modelu bylo přistoupeno k modelu z pohledu jeho elektrických vlastností se závislostí na průtoku čerpadel a na teplotních závislostech. Jelikož se nemodelovalo na základě elektrochemických dějů a principů, vycházelo se z premisy uvedené v článku od autora Barote [2], v kterém je podobný typ akumulátoru také formulován.



Obr. 5.2: Elektrický model VRB, podle [2] upraveno autorem

$$U_{OCV} = U_{norm} + 2 \frac{RT}{F} \log \left(\frac{SOC}{1 - SOC} \right) \quad (V) \quad (5.22)$$

kde

U_{norm} ... je referenční napětí akumulátoru, pro n článků platí: nU_e (V)

R ... je plynová konstanta ($J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$)

T ... je termodynamická teplota (K)

F ... je Faradayova konstanta ($C \cdot mol^{-1}$).

Vztah (5.22) je odvozen ze vztahu (5.2).

Pro zjištění funkčních závislostí byla použita *fitovací* funkce v prostředí Gnuplot a Mathema-

tica. Následně byla sestavena napěťová rovnice pro nabíjení (5.23) a vybíjení (5.24):

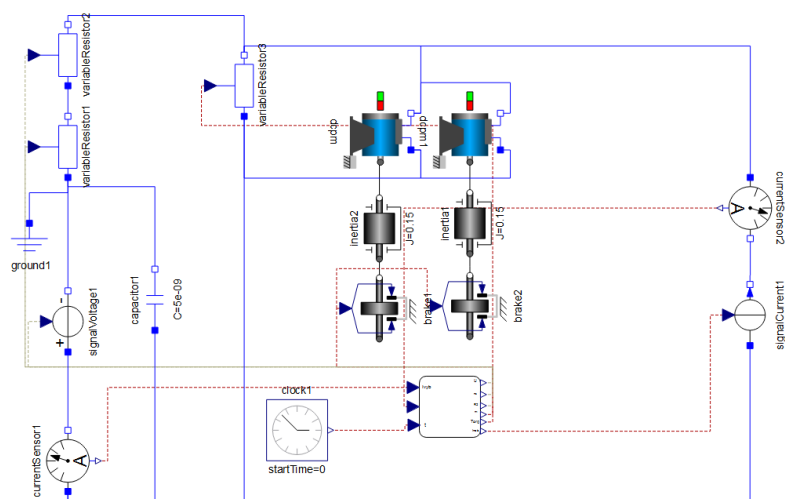
$$\{U_{OCV}\} = -0,0138SOC^2 + 0,535SOC + 56,0493 \quad (5.23)$$

$$\{U_{OCV}\} = -1,1132SOC^2 + 5,8633SOC + 44,791 \quad (5.24)$$

Rovnice byly definovány pro napájení konstantním napětím 56,5 V (kdy se sledovalo zejména chování článku při odběru proudu) a vybíjení při konstantním odběru 40 A (se sledováním poklesu napětí). Z toho jasně vyplývá, že pro lepší aproximaci a zpřesnění hodnot by bylo potřeba změřit více charakteristik při rozdílných požadavcích.

Další částí je simulace vnitřních rezistencí článků a kapacit. Není možné článek podrobit důkladnému rozboru a změření jednotlivých parametrů, proto bylo přistoupeno k využití dat z článku [2] tedy, že při teplotě 20 °C je $R_{resist} = 0,045 \Omega$ a $R_{resist,ztrty} = 0,0345 \Omega$ a $R_{fixn} = 13,889 \Omega$. Následně byl vytvořen blok, který řeší jednotlivé veličiny s názvem „Calculator“. Tento blok je specifikován více v diplomové práci [11].

Schémat jednotlivých modelů, která byla vytvořena se nacházejí na obrázku 5.3.



Obr. 5.3: Model baterie vytvořený s pomocí mechanické brzdy pro nabíjení [11]

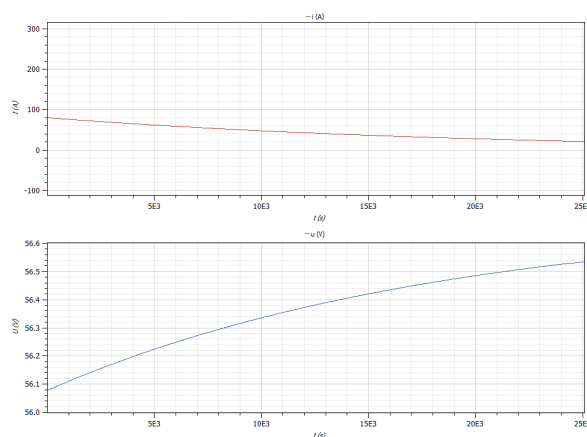
6 Výsledky ze simulace

6.1 Zhodnocení modelu

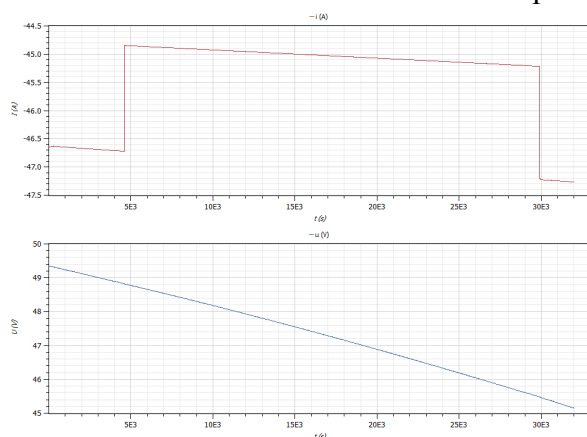
Modelovaný akumulátor vychází z několika poznatků podobných zařízení ve světě. Na základě znalostí s modelováním ostatních akumulačních článků bylo přistoupeno k podobné filozofii i u vanadového akumulátoru. Konkrétně u tohoto typu je naprostý nedostatek informací např. o plochách elektrod, počtu článků, průtoku a jiných základních vlastnostech.

Při úvodním měření byly změřeny základní charakteristiky, které jsou uvedeny na obrázcích. Na základě nich byla vytvořena fitovací funkce a zjištěna rovnice funkční závislosti. Na základě ní a podobných zařízení byla rovnice modifikována dle stupně nabití a změnou regulačních rezistorů. Pro větší a přesnější prověření je nezbytně nutné proměřit více charakteristik při různém zatížení. Tato evaluace bude dokončena po zkompletování zařízení.

Výsledné grafy ze simulace:



Obr. 6.1: Průběh veličin modelovaného článku při nabíjení



Obr. 6.2: Průběh veličin modelovaného článku při vybíjení se znatelným skokem, při snížení otáček čerpadel

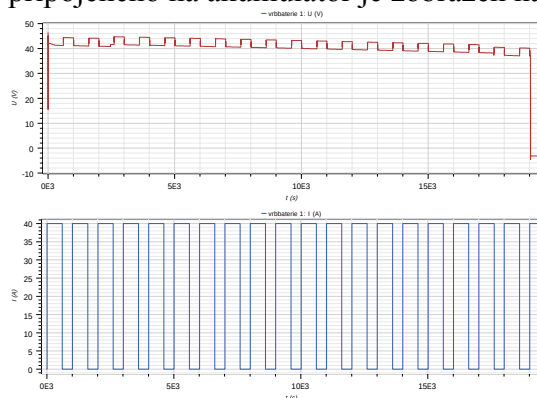
Dá se předpokládat, že akumulátor se bude chovat poměrně konzistentně respektive, parametry nebudou záviset na rychlosti vybíjení nebo nabíjení. Ze své podstaty by nemělo docházet ani k prudkým poklesům, napětí při přechodu z provozu standby do maximálního vybíjení v rámci jedné úrovně SOC. DC strana akumulátoru bude připojena přes hybridní nabíjecí/vybíjecí stanici do paralelní sítě AC. Zejména bude důležité ověřit funkci modelu čerpadel, která se největší měrou podílejí na vlastní spotřebě akumulátoru. Jejich průtokový algoritmus vypadá, že je řízen zpětnovazební proudovou smyčkou.

7 Sítě Smart Grid

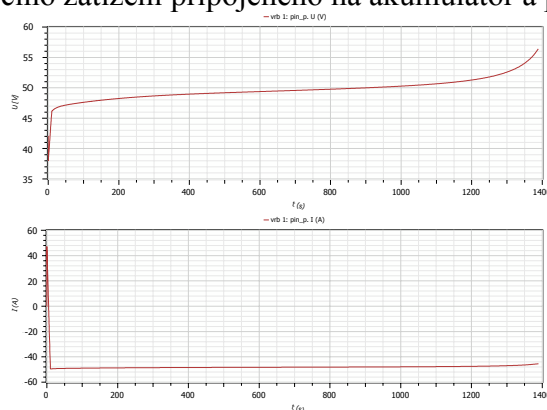
7.1 Definice Smart Grid

Smart Grid je novým pojmem v energetice. V řadě odborných publikací a nejen zahraničních jsou některé pojmy zaměňovány nebo špatně interpretovány.

Průběh pulsujícího zatížení připojeného na akumulátor je zobrazen na obrázku 6.3:



Obr. 6.3: Průběh pulsujícího zatížení připojeného na akumulátor a pokles napětí na svorkách



Obr. 6.4: Průběh nabíjecího napětí a proudu z větrné elektrárny do akumulátoru

Těmito pojmy jsou:

- centrální zdroj,
- decentrální (disperzní) zdroj,
- virtuální elektrárna,
- Smart Grid.

Centrální zdroje jsou jednotky obvykle velkých jednotkových výkonů. Jsou centralizované tzn., že se nacházejí na místech, která jsou vhodná pro tyto zdroje z několika hledisek. Tím prvním je blízkost zdroje paliva (popřípadě dostatek chladicí vody). Tyto zdroje jsou většinou konvenční elektrárny (jaderné, tepelné, velké paroplynové, velké solární) Jejich instalované výkony se pohybují v řádech desítek a ž stovek megawattů.

Decentralizované zdroje jsou jednotky, které nejsou závislé na místě palivové základny a jsou dostatečně schopné pracovat s různými zdroji paliv. Většinou využívají právě místní dostupné primární zdroje v optimálním množství tak, aby byla zaručena rovnováha mezi výrobou a spotřebou v místě instalace. Jsou obvykle nižších výkonů, řádově do jednotek MW.

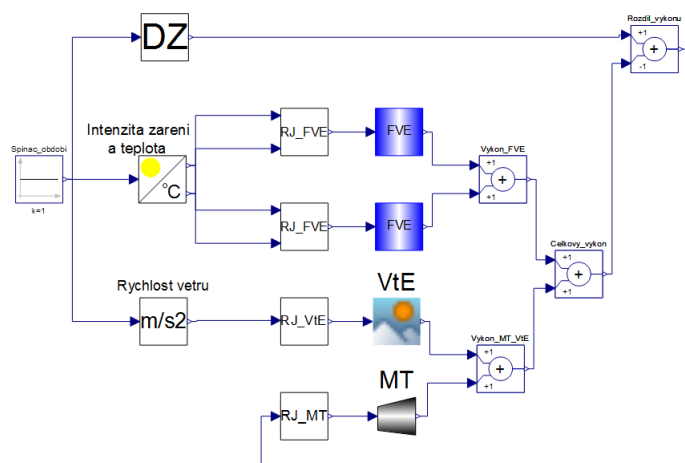
Virtuální elektrárny je pojem, který je především využíván při obchodování s elektrickou energií. Pomocí „virtuální elektrárny“ je obchodník schopen dodávat elektřinu (kterou předtím nakoupil), aniž by disponoval opravdovou kapacitou. Dnes je spíše tímto pojmem myšleno sjednocení mnoha malých zdrojů do jednoho řídicího centra, které vytvoří jeden „velký“ blok.

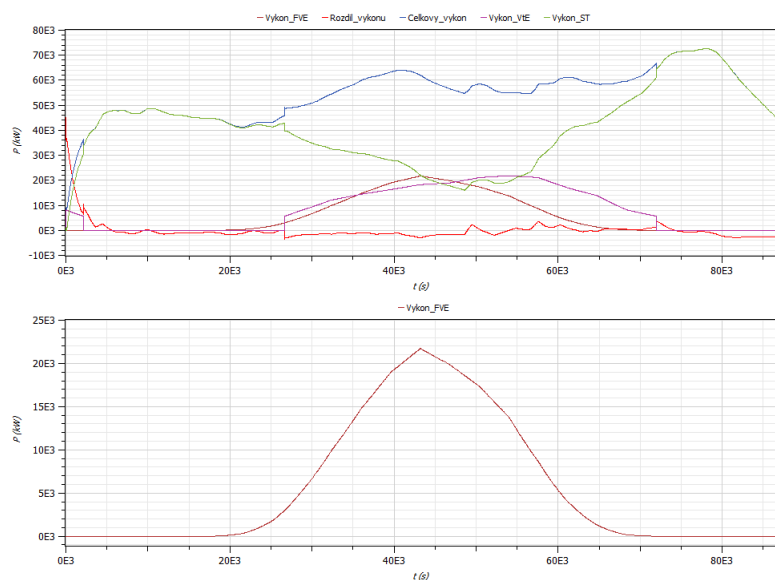
Tabulka 7.1: Porovnání současných distribučních sítí se systémy Smart Grid [8]

Přeforovaná charakteristika	Současné síť	Chytré síť (Smart Grid)
Uvědomělý spotřebitel	Spotřebitel není informován, nejeví zájem	Spotřebitel informován, participuje na dění v síti
Zahmutí všech elektráren a záložních zdrojů	Dominance velkých zdrojů energie, ...	Mnoho malých zdrojů - disperzní zdroje
Údržba, ekonomika a zavádění nových produktů	Pouze omezená nabídka, malá možnost implementace nových produktů	Plně začlenění nových technologií, ekonomická svoboda i pro koncového zákazníka
Kvalita elektrické energie	Výpadky z důvodu nekvality elektřiny	Kvalita elektřiny je prioritní, cenová kompenzace za nekvalitu
Optimalizace a efektivní řízení	Malá integrace dat z provozu se správci	Značná informovanost, která je zakomponována do chování sítě, minimalizace dopadů na zákazníka
Předvídatelnost požadavků a poruch	Požadavky na prevenci poškození a výpadků	Automatická detekce problémů a jejich následné odstranění.
Odolnost sítě k přírodním katastrofám	Zranitelnost systému při úmyslném napadení a přírodních pohromách	Možnost účinně eliminovat problémy rekonfigurací sítě.

Smart Grids jsou sítě, které jsou evolucí současných soustav. Chytré nebo-li inteligentní sítě jsou schopné reálného informačního kanálu, který dovoluje kontrolovat aktuální stav sítě s možností vlastních transformací.

V současné době je síť založena na klasické topologii, která sestává z výroben a spotřebičů, jak ilustruje obrázek. Naprostá většina velkých zdrojů energie je zapojena na nejvyšší úrovni, tedy na přenosových linkách s napětím 400 kV a 220 kV. Dále přes distribuční úrovně (110 kV a 22 kV) je energie vedena ke spotřebitelům. Výkon je tedy topologicky veden se shora dolů. Tomu odpovídá i systém ochrany, které reflektují tuto skutečnost. Naopak Smart sítě jsou vedeny okružně s cílem dosáhnout optimálního začlenění všech zdrojů (zejména rozptýlených) do všech napěťových úrovní. Směry toků výkonů se mohou měnit – nemají jednotný směr. V tomto systému již není možné provozovat ochranné prvky tak, jak tomu bylo v klasické soustavě. V případě realizace tohoto typu sítě bude nutné změnit systémy automatizace, dynamiky sítě a podobně.

**Obr. 7.1:** Model pro zjištění chování v malé microgrid síti [6]



Obr. 7.2: Průběhy výstupních veličin pro jeden den

7.1.1 Vyhodnocení modelu

V první verzi modelu byl zahrnut i akumulátor, který byl použit místo dodatečného energetického zdroje. Po skončení simulace bylo vyhodnoceno, že použití akumulace je nereálné. Z průběhů na obrázku 7.2 lze zjistit, že pro určité oblasti není možné akumulátor použít. Proto bylo přistoupeno k realizaci motor-generátoru, který je schopen pružně reagovat na poptávku elektrické energie.

8 Závěr

8.1 Shrnutí základních poznatků

Rostoucí podíl obnovitelných zdrojů energie na celkové spotřebě energie je nejvýznamnějším rysem trvale udržitelného rozvoje lidské společnosti v oblasti energetiky. S tím je však nerozlučně spjata potřeba přijmout vlastnosti těchto zdrojů jako standard pro procesy řízení elektrizační soustavy a současně do budoucna provozovatele a případné investory připravit na povinnost kontinuální dodávky elektrické energie bez náhlých změn a v rámci dohodnutého diagramu dodávky. Pouze dříve zmíněné metody jsou možností jak v podmínkách širokého energetického mixu docílit bezproblémového chodu a omezit nevyzpytatelné výkonové rázy. Akumulace energie může udělat z OZE spolehlivý zdroj v dodávkách energie a to i v rámci denního diagramu zatížení.

Díky nevhodnému nastavení dotační politiky nemáme nouzi o zdroje ve výkonech řádu jednotek až desítek megawattů. Tento systém se ukázal jako naprosto nevhodný a i přes určitou regulaci (snížení dotační ceny o maximálně 5 % za rok) nedokázal aktuálně vykrývat snižující cenu fotovoltaických panelů na trhu.

Silní investoři z ČR i ze zahraničí začali instalovat zdroje na velké orné plochy i přesto, že zejména pro fotovoltaické elektrárny bylo původně plánováno s využitím v rámci domovních instalací, tedy zdrojů s malým jednotkovým výkonem. Tyto zdroje zde budou minimálně 15 let (garantovaná výkupní cena) a v současné době, kdy cena technologie již poklesla tak, že začíná být ekonomicky výhodné tyto zdroje instalovat i bez podpory, lze očekávat další nárůst instalovaného výkonu.

Také v těchto souvislostech lze ze strany provozovatelů sítí očekávat rostoucí požadavky na rovnoměrnost dodávky a současně ze strany uživatelů zejména menších instalací rostoucí požadavky na efektivní místní využití elektrické energie v místě výroby. Z dlouhodobějšího pohledu je nutné kromě kolísání výkonu některých obnovitelných zdrojů věnovat pozornost také vyrovnané bilanci mezi výrobou a spotřebou elektrické energie. Limitní možnosti této bilance jsme schopni reálně krýt současnými technologiemi, především vodními elektrárnami. Z hlediska nové koncepce řízení a provozování elektrických sítí (tzv. SmartGrids) je jeví jako další použitelný systém využití potenciál u akumulace v elektromobilech. Z dlouhodobého pohledu (kdy se plánuje využití i tzv. plug-in hybridních automobilů ke zlepšení výkonových bilancí v distribučních soustavách) je tedy nutná dostatečná kooperace systémů výroba–spotřeba a s tím také souvisí předpoklad rostoucích požadavků na funkční a ekonomicky přijatelné systémy akumulace elektrické energie.

Na území České republiky je poměrně pravděpodobné další rozšíření přečerpávacích vodních elektráren. Většinou se však jedná o rekonstrukci stávajících děl (například elektrárna Orlík). Nicméně přečerpávací elektrárna je systém velmi robustní a tedy nevhodný pro lokální použití. Pro menší jednotky (menší výkon, menší akumulační kapacita) lze o této metodě uvažovat, ale pouze pokud to místní podmínky umožňují. PVE také výrazně mění krajinný ráz, který je dnes velmi hodnocen. Pro velké zdroje je velmi často dalším nezbytným předpokladem posílení přenosové/distribuční sítě.

Dalším perspektivním skladovacím zařízením jsou akumulátory na bázi redox systému, které vynikají svými užitnými vlastnostmi s relativně malými nároky na údržbu. Taktéž jejich modulovatelnost je výborná. Jediným omezením může být ekologická perspektiva (umístění velkých tanků v přírodě).

Dalším principem akumulace je akumulace energie do vodíku. Vodíková platforma je v současnosti poměrně preferovaná a na poli výzkumu silně dotovaná technologie. Ale vodík je pouze nosič energie. Celá koncepce je nerealistická ve velkých objemech. Pokud se týká menších jednotek, které by kombinovaly jednak elektrolyzátor a palivový článok (jako kogenerační), lze si představit nasazení na malých aplikacích. Domnívám se, že problémy s infrastrukturou a malou účinností systému, nepředurčují využití vodíku v blízké budoucnosti. Modelace vodíkového cyklu ukazuje [4], že se pravděpodobně jedná o špatnou cestu.

Setrvačnickové jednotky jsou z pohledu konstrukce, výroby a instalace velice nenáročné. Umístit tyto jednotky do provozu je předmětem dalšího výzkumu. Jejich praktickému využití brání zatím relativně malá akumulční kapacita.

Lithiové baterie jsou dnes velmi používané zejména v malých aplikacích. Jejich dalšímu rozvoji brání vysoká cena a pro energetiku zatím nedostatečně vyřešený nabíjecí a vybíjecí cyklus. Není nutné je formovat, ale vybití pod cca 40 % kapacity je znehodnotí.

Ostatní technologie a systémy popsané v základním textu jsou často ve stádiu vývoje a pilotních studií. Výzkumné zprávy a informace pocházejí z laboratorního prostředí a v praxi se zařízení zatím neuplatnila.

Tepelná akumulace je schopna pokrývat řadu nynějších metod a postupů. V současnosti je akumulace prostřednictvím tepla realizována zejména v teplárnách. V teplovodech (přechází se z parního topení na teplou vodu) je možná akumulční schopnost relativně velká (TJ). Pro energetické aplikace – druhotné využití při výrobě elektrické energie – není ale prakticky využitelná. Teplo je nutné převést na vyšší energetickou hladinu. K tomu by bylo možné využít tepelného čerpadla, u kterého je limitujícím faktorem teplota vstupního média.

Předložená disertační práce se nezabývala řešením konkrétního příkladu řešení disharmonie vztahu mezi výrobou a spotřebou elektrické energie z OZE. Cílem bylo mimo jiné poukázat na šíři a komplikovanost situace. Pro malé aplikace je zpracováno dostatek podobných typických řešení (např. [12]). Tyto aplikační poznatky nelze přenést do sítě s velkými zdroji elektrické energie a stochastickými zdroji, aniž by byla řešena ekonomická stránka. Řešení čistě na úrovni klasických rozhodovacích pravidel typu NPV (čistá současná hodnota) nebo IRR (vnitřního výnosového procenta) nelze také považovat za vhodné, protože řada zdrojů je podporována a tím je jejich ekonomika zkreslena. Není vytvořen legislativní rámec, podle kterého by bylo možné říci, že akumulční prostředky pro zdroje se stochastickou výrobou jsou nutným doplňkem či podmínkou pro připojení do sítě.

8.2 Závěr z předložených aspektů a podmínek použití akumulčních prostředků v sítích

Aspekty a podmínky nasazení akumulčních prostředků

1. Akumulace elektrické energie, potažmo zásobníky elektrické energie lze využít pro obnovitelné zdroje elektrické energie jako jejich doplněk pro zrovnoměnění dodávky elektřiny do ES.
2. Zásobníky lze použít i jako *nutný* doplněk k obnovitelným zdrojům elektrické energie, určený legislativou a připojovacími podmínkami provozovatelů ES.
3. Akumulací elektrické energie prostřednictvím akumulátorů lze docílit lepší regulovatelnosti ES za předpokladu, že budou akceptovány vlastnosti zásobníků a budou utvořeny podmínky pro jejich použití v rámci decentralizovaných zdrojů a regulace na úrovni distribuce.
4. Akumulátory lze použít pro zlepšení kvality elektrické energie a také k zálohování spotřeby první kategorie.
5. Pro záložní zdroje velkých výkonů je vhodné využití akumulátorů, kde lze počítat se značnými úsporami nákladů na provoz současných záložních jednotek (myšleno např. ztrátové vytápění na provozní teplotu dieselgenerátorů). Typickými zdroji jsou například

jaderné elektrárny s dieselgenerátory pro případné výpadky napájení (časový koeficient v tomto případě je nutné velmi dobře zvážit a následně použít mobilní záložní jednotky).

6. Akumulační prostředky jsou nezbytné pro fungování tzv. „chytrých“ sítí (obecně označovaných jako Smart Grid). Stejně jako v sítích lokálních (Micro Grid).

- Ad 1) Tento hlavní aspekt byl z hlediska akumulace elektrické energie prvořadým, proč se uvažovalo o jakékoliv akumulaci již v historii. Jak deklaruje předchozí text je i použití akumulčních systémů stále ještě nepříliš rozšířené, jak z důvodu legislativních, ekonomických a zejména technických.
- Ad 2) Legislativa, zejména připojovací podmínky uvedené například v PPDS, příloze 4 není povinnost provozovatelů k instalování akumulátorů. Vzhledem k decentralitě zdrojů a jejich velikosti je penetrace těchto zařízení v síti malá, přičemž v odlehlých místech dokonce způsobují zlepšení napěťových poměrů na konci vedeních.
- Ad 3) Regulování soustav je složitý proces. K regulaci elektrizační soustavy na úrovni přenosové soustavy jsou využity přečerpávací elektrárny, ale pro jejich velkou kapacitu a velký výkon nejsou vhodné pro regulaci elektrických sítí na úrovni distribučních soustav. V tuto dobu není poptávka po začlenění přečerpávacích vodních elektráren do distribučních soustav nebo nebyla alespoň zaznamenána. Je ale žádoucí použít akumulátory i v DS, v které by mělo dojít (dle zahraničních pramenů) k výraznému zefektivnění výroby a spotřeby elektřiny – viz Smart Grid.
- Ad 4) V této rovině je akumulace nezastupitelná. Malé jednotky UPS jsou používány pro napájení datových center, popřípadě jsou ve větších celcích využívány v nemocnicích. Tedy všude tam, kde je dodávka v první kategorii. Je však třeba zdůraznit, že kvalita elektrické energie silně závisí na bodu číslo 2. a 3.
- Ad 5) Záložní napájení velkých energetických celků je řešeno pouze za použití motorgenerátorů (výjimečně přečerpávací elektrárny u jaderných zdrojů). Avšak sofistikovaným návrhem vhodného typu akumulátoru (NaS, VRB) lze docílit zajímavých úspor energie a primárních paliv. S tím souvisí i pokles emisí CO₂.
- Ad 6) Smart Grid je v současné době velmi medializované téma, která zatím nemá technologický základ. Nemůžeme považovat samoodečitatelné měřiče energií za inteligentní systémy. Role obnovitelných zdrojů bude v budoucnu narůstat, minimálně v objemech malých autonomních jednotek. V tomto případě je lepší uvažovat spíše než o Smart Grid v rovině Micro Grid, které budou zakomponovány v páteřních systémech. Na základě provedené analýzy se můžeme domnívat, že implementace zdrojů do lokálních sítí, pracujících v relaci ostrovní sítě s dostatečnou akumulační a zdrojovou základnou, je budoucností elektroenergetiky.

8.3 Doporučení k nasazení zásobníků elektrické energie

Předchozí kapitoly se zaměřovaly na aspekty jednotlivých druhů akumulčních systémů z pohledů technicko-ekonomických. V této části by čtenář měl najít základní nástin použití současných druhů zásobníků el. energie pro stabilizaci, popřípadě doplnění stávajících přenosových a distribučních profilů.

8.4 Výrobní bloky

Pro záložní zdroje energie jsou jednoznačně akumulátorové sestavy nejvhodnější. Dnes se tak činí zejména v oblasti jaderných elektráren. Takzvané bateriové sály jsou obvykle vybaveny staničními olověnými akumulátory. Slouží jako první bariéra při náhlém výpadku napájení – první záložní zdroje.

Dalšími záložními zdroji napájení (ZZN) jsou potom diesel generátory. Jejich hlavní nevýhodou je velká vlastní spotřeba – veškeré motorové jednotky jsou přehřívány na provozní teplotu (plné njetí do 10 sekund). Například jaderná elektrárna Dukovany má záložní motor generátory v počtu 12 kusů. Každý přehřev má příkon 100 kW. To činí celkový příkon

$$P_{DG} = 1,2 \text{ MW}.$$

V tomto případě je ideální použití VRB, respektive skupiny průtokových baterií. Docílíme tím snížení vlastního příkonu náhradních agregátů i dodatečných nákladů v podobě nákupu motorové nafty a celkové údržby systému (olejové hospodářství, budící jednotky aj.).

8.5 Cíle disertační práce a jejich splnění

Tato práce měla za cíl provést komplexní analýzu možností akumulačních systémů použitelných pro akumulaci elektřiny v elektrizačních soustavách, věnovat se určitému druhu, matematicky ho popsat a model ověřit na reálném zařízení.

8.5.1 Seznámení se s momentálními způsoby akumulace elektřiny

V rámci plnění prvního dílčího cíle bylo popsáno kompletní technologické zázemí moderních zásobníků elektrické energie. Velká část kapitoly se věnovala průtočným akumulátorům, které z hlediska dlouhodobého provozu a rychlosti změn režimu nabíjení-vybíjení splňují hlavní kritérium pro začlenění do elektrizační soustavy.

8.5.2 Akumulace za využití tepelných soustav

V rámci plnění druhého dílčího cíle byly analyzovány možnosti využití tepelných čerpadel pro akumulaci elektrické energie. Výpočty a modely, které reagovaly na potřeby akumulace tepla v síti se ukázaly jako ne příliš vhodné pro větší výstavbu. Současně schopnost těchto systémů zpětně dodávat elektrickou energii je pro praktické využití velmi omezená.

8.5.3 Návrh matematického modelu

V rámci plnění třetího dílčího cíle bylo navrženo schéma a matematický model vybraného akumulačního prostředku, kterým byl vanadový akumulátor. Bylo odsimulováno několik průběhů při provozu a navrženého modelu bylo využito při realizaci malé sítě.

8.5.4 Sestavení funkčního modelu

V rámci plnění dalšího dílčího cíle byl na základě předchozích zkušeností s modelováním akumulátoru v prostředí Modelica® sestaven funkční model vanadového akumulátoru a bylo provedeno ekonomické hodnocení akumulačních soustav. Z dostupných materiálů se jeví jako nejvhodnější způsob pro ocenění podobných zdrojů metoda stochastických výpočtů, která reflektuje časovou proměnlivost dodávek a spotřeby elektrické energie. Dále je možné využít některých dostupných finančních metod pro oceňování některých druhů cenných papírů (například Black-Scholesova metoda oceňování aktiv).

8.5.5 Provedení experimentálního měření

Posledním dílčím cílem bylo otestování vytvořeného modelu na reálné aplikaci vanadového akumulátoru. Tato část byla realizována v omezené míře, zejména z technicko-organizačních důvodů. Jedná se v ČR o unikátní zařízení. Zařízení bylo dodáno se zpožděním a neúplné. Z toho důvodu nebylo možné provést všechny potřebné testy pro ověření plné funkčnosti modelu a prověření celé koncepce. V rámci možností bylo provedeno ověření chování akumulátoru při rozdílných zatíženích.

8.6 Přínos práce

Práce se zabývala několika oblastmi, ve kterých vznikly následující výstupy:

- byla provedena důkladná rešerše stávajících technologií pro akumulaci elektrické energie (publikováno v odborné knize [A9]),
- byl vytvořen model vanadového akumulátoru, který v dostupné české literatuře nebyl dosud popsán. Jako simulační prostředím byl použit sw Modelica[®], který byl v ČR poprvé vyzkoušen a testován pro modelování elektroenergetických jevů (dílní výsledky byly prezentovány na konferencích), byl vytvořen model vanadového akumulátoru, který v dostupné české literatuře nebyl popsán,
- byly vytvořeny dílčí modely – větrná elektrárna, akumulátor, zátěž a ekonomický model ocenění.

Téma práce je multioborové. Studium elektrofyzikálních vlastností akumulačních prostředků, jejich modelace a celkové hodnocení z hlediska ekonomických výdajů jsou základem pro správné použití zásobníků elektrické energie. Je zřejmé, že v celkovém kontextu a vyznění zadání práce nelze jednoznačně stanovit typ akumulátoru, jeho kapacitu, výkon a životnost. Každé použití akumulátoru je velmi specifické a závislé na místních podmínkách.

Z dostupných materiálů, ze kterých bylo čerpáno, je patrné, že v průběhu posledních několika let se situace na poli akumulace elektrické energie dynamicky vyvíjí. Průmyslové použití je dnes již poměrně běžné, ale ne u velkých energetických oblastí. To je způsobeno zejména tím, že energetika pro širší nasazení vyžaduje systémy, které jsou odzkoušené a mají dostatečnou spolehlivost. Proto se stále nejčastěji hovoří o přečerpávacích vodních elektrárnách, které jsou spolehlivé, s velkou kapacitou a relativně nízkými náklady na výstavbu (nikoliv absolutní) vzhledem k životnosti zařízení.

Modelování jednotlivých akumulačních prostředků je na velmi vysoké úrovni. V době psaní práce je na trhu již celá řada kvalitního výpočtového softwaru (TRNSYS, PVSyst aj.), které jsou zaměřené přímo na akumulaci jak tepla, tak elektřiny, a které obsahují i balíčky nejčastěji používaných typů zásobníků.

Přínosem práce je zejména definování nových oblastí využití akumulačních prostředků. Ve většině odborných kruhů je pojem akumulace zmiňován pouze v souvislosti s omezením vlivu stochastických zdrojů energie. Nicméně je to oblast velice široká a práce si vytyčila několik bodů, které je nutno hlouběji rozvíjet a zkoumat a to zejména s ohledem na možnosti zapojení do distribučních a přenosových soustav.

Další přínosem je nový pohled na ocenění výroby ze zdrojů s náhodným charakterem výroby elektrické energie pomocí investiční matematiky s využitím lineárních a jiných modelů. V této oblasti je velký prostor pro nové přístupy a návrhy k řešení této problematiky a souvisí s také možnosti optimalizace výrobních bloků s ohledem na cenu produkované energie. V oblasti Smart systémů je vidět (a bylo modelováno), že akumulace nevyřeší veškeré problémy sítí, kde jsou nutně potřebné i stabilní jednotky (v našem případě kogenerace, plynový motor). Je-li málo zdrojů v soustavě, není možnost dostatečně pružně řešit požadavky odběru – dodávky.

Pokud bychom chtěli pojmut celou oblast akumulace s modelováním a zahrnutím veškerých dostupných řešení, výsledek by překračoval rozsah práce. Autor se pokusil postihnout problematiku akumulace elektrické energie v kontextu energetiky a naznačení dalšího směru vývoje v této oblasti.

Curriculum Vitae

Osobní údaje Ing. Lukáš Radil
Oslavanská 218
664 11 Zbýšov
email: radil.lukas@gmail.com
Datum narození: 10.10.1983
Místo narození: Ivančice

Vzdělání

1999 – 2003 Maturitní zkouška s vyznamenáním na Střední průmyslové škole elektrotechnické, Kounicova 16, Brno
2003 – 2006 Bakalářské studium na Ústavu elektroenergetiky Vysokého učení technického v Brně, téma bakalářské práce: Návrh větrné elektrárny a posouzení jejího využití
2006 – 2008 Magisterské studium na Ústavu elektroenergetiky Vysokého učení technického v Brně, téma diplomové práce: Akumulace elektrické energie z obnovitelných zdrojů
2008 – 2013 Doktorské studium na Ústavu elektroenergetiky Vysokého učení technického v Brně, téma disertační práce: Eliminace diskontinuity dodávky elektrické energie z obnovitelných zdrojů

Praxe

2008 – doted' Cvičení odborných předmětů na UEEN: Výroba elektrické energie, Nekonvenční zdroje, Malé zdroje elektrické energie, Strojní zařízení elektráren, Energetická zařízení elektráren, Elektrotepelná technika, Jaderné elektrárny, Jaderně energetická zařízení
2008 – 2013 Spolupráce na řešení několika grantů
2011 – 2012 Spolupráce s Ústavem procesního a ekologického inženýrství VUT v Brně při řešení problematiky modelace výstupních diagramů dodávek tepla a elektrické energie v kombinované výrobě elektřiny a tepla
2008 – 2009 Zpracování typových diagramů v EGÚ Brno

Ostatní dovednosti

jazykové Angličtina, Ruština, Španělština
stáže Dvouměsíční stáž na Iževském státním technickém institutu, Iževsk, Udmurtia, Ruská federace

Literatura

- [1] BARD, A. J.; PARSONS, R.; JORDAN, J.: *Standard potentials in aqueous solutions*, ročník 6. CRC press, 1985.
- [2] BAROTE, L.; MARINESCU, C.; GEORGESCU, M.: VRB modeling for storage in stand-alone wind energy systems. In *PowerTech, 2009 IEEE Bucharest*, 2009, s. 1–6, doi:10.1109/PTC.2009.5281922.
- [3] BLANC, C.; RUFER, A.: Understanding the Vanadium Redox Flow Batteries. *Paths to Sustainable Energy*, 2010: s. 333 – 359, doi:10.5772/13338, inTech.
URL <<http://www.intechopen.com/books/paths-to-sustainable-energy/understanding-the-vanadium-redox-flow-batteries>>
- [4] BOSSEL, U.: Does a Hydrogen Economy Make Sense? *Proceedings of the IEEE*, ročník 94, č. 10, Říjen 2006: s. 1826–1837, ISSN 0018-9219, doi:10.1109/JPROC.2006.883715.
URL <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4016414>>
- [5] BRDIČKA, R.; DVOŘÁK, J.: *Základy fyzikální chemie*. Academia, 1977.
- [6] CABALA, L.: *Spolupráce mikro zdrojů v rámci malé smart grid [online]*. Diplomová práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Brno, červen 2013, vedoucí: Ing. Lukáš Radil.
- [7] FRITZSON, P.: *Principles of Object-Oriented Modeling and Simulation with Modelica 2.1*. John Wiley & Sons, 2004, ISBN 9780471471639.
- [8] GRIDWISE ARCHITECTURE COUNCIL: The Modern Grid Initiative. *Pacific Northwest National Laboratory*, 2008.
- [9] HNUTÍ DUHA: Chytrá energie. Online, datum citace: 28.4.2010.
URL <http://chytraenergie.info/wp-content/uploads/2010/04/chytra_energie.pdf>
- [10] KOFRÁNEK, J.; HOZMAN, J.: *Pacientské simulátory*, ročník 1. Creative Connections, s.r.o, 2013, ISBN 978-80-904326-6-6.
- [11] KORNIAK, D.: *Matematický popis VRB baterie [online]*. Diplomová práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Brno, červen 2013, vedoucí: Ing. Lukáš Radil.
- [12] KOTĚŠOVEC, J.: *Studie autonomního napájení rodinného domu elektřinou ze střešních fotovoltaických panelů*. Diplomová práce, Západočeská univerzita v Plzni, 2012.
- [13] SKYLLAS-KAZACOS, M.; GROSSMITH, F.: Efficient vanadium redox flow cell. *Journal of the Electrochemical Society*, ročník 134, č. 12, 1987: s. 2950–2953.
- [14] VIJAYAKUMAR, M.; LI, L.; GRAFF, G.; aj.: Towards understanding the poor thermal stability of V^{5+} electrolyte solution in Vanadium Redox Flow Batteries. *Journal of Power Sources*, ročník 196, č. 7, 2011: s. 3669–3672.
- [15] WEBER, A. Z.; MENCH, M.; MEYERS, J.; aj.: Redox flow batteries: a review. *Journal of Applied Electrochemistry*, ročník 41, č. 10, 2011: s. 1137–1164, ISSN 0021-891X, doi: 10.1007/s10800-011-0348-2.
URL <<http://dx.doi.org/10.1007/s10800-011-0348-2>>

[16] WOLFRAM RESEARCH: *User Guide – WolframSystemModeler*. první vydání, 2012.

Vlastní publikace

- [A1] RADIL, L.; GREGOR, J. *Unusuall accumulation of electric energy of big capacity*. In Proceedings of the FIRST FORUM OF YOUNG RESEARCHERS. Izhevsk. 2008. p. 321 - 325. ISBN 978-5-7526-0355-6.
- [A2] RADIL, L.; MASTNÝ, P. *Renewable sources and their accumulation of electric energy*. In Proceedings of the 10th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2009. 1. VŠB-TU Ostrava. 2009. p. 246 - 248. ISBN 978-80-248-1947-1.
- [A3] RADIL, L.; BARTOŠÍK, T.; MASTNÝ, P. *Problems of Wind Power Plants from Point of View of Grid*. In Energy Problems and Environmental Engineering, WSEAS e-journal Energy and Environment. Energy and Environmental Engineering Series. University of La Laguna, Tenerife, Spain, WSEAS Press. 2009. p. 369 - 373. ISBN 978-960-474-093-2, ISSN 1790-5095.
- [A4] RADIL, L.; MASTNÝ, P. *The Usage of Compressed Air Energy Storage in Cooperation of Geothermal Energy in the Czech Republic*. In Proceedings of the 11th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2010. 1. Brno, Brno University of Technology, FEEC, DEPE. 2010. p. 369 - 373. ISBN 978-80-214-4094-4.
- [A5] RADIL, L.; MASTNÝ, P. *Simulation Cycle of Heat Pump by the help of Wolfram Mathematica*. In Proceedings of the 11th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2010. 1. Brno, Brno University of Technology, FEEC, DEPE. 2010. p. 375 - 377. ISBN 978-80-214-4094-4.
- [A6] MASTNÝ, P.; RADIL, L.; MASTNÁ, Z. *Analysis of Operating Characteristics of Multivalent Systems Using Renewable Energy Sources in Terms of Mathematical Modelling*. In Recent Researches in Energy, Environment, Entrepreneurship, Inovation. WSEAS. Lanzarote, Canary Islands, Spain, WSEAS, EUROPMENT. 2011. p. 103 - 108. ISBN 978-1-61804-001-5.
- [A7] RADIL, L.; MASTNÝ, P. *A Model Battery for Smaller Energy Storage System*. International Scientific Event - Power Engineering 2011. Bratislava, Slovakia, Slovak University of Technology in Bratislava. 2011. p. 173 - 174. ISBN 978-80-89402-38-0.
- [A8] MASTNÝ, P.; RADIL, L.; MASTNÁ, Z.; BARTOŠÍK, T. *Current Situation in the Operation of Photovoltaic Systems in the Czech Republic*. In Recent Research in Energy, Environment and Landscape Architecture. Angers, France, WSEAS Press. 2011. p. 129 - 134. ISBN 978-1-61804-052-7.
- [A9] MASTNÝ, P.; DRÁPELA, J.; MACHÁČEK, J.; PTÁČEK, M.; RADIL, L.; BARTOŠÍK, T.; PAVELKA, T.; MIŠÁK, S. *Obnovitelné zdroje elektrické energie*. EFEKT. Praha, České vysoké učení technické v Praze. 2011. 256 p. ISBN 978-80-01-04937-2.
- [A10] RADIL, L.; MASTNÝ, P.; BARTOŠÍK, T. *Effect of shading photovoltaic panel interception rods in lightning protection*. In Recent Researches in Electric Power and Energy Systems. Electrical Engineering Series. Chania, Crete Island, Greece, WSEAS Press. 2013. p. 93 - 98. ISBN 978-960-474-328-5.

Abstract

Doctoral thesis deals with domain of electric energy storage. It seeks to define the methods of accumulation, which can be used in industrial applications and define the conditions for the use of storage systems in electric power systems with extended penetration of renewable energy sources. In the context of current developments in this field is analyzed detail one of the perspective storage systems – Vanadium Redox Battery (VRB). One of the outcomes of this work is economic and energy analysis of storage systems, which are conceived with a disproportion between production and consumption of energy. The work was supported by the Centre for Research and Utilization of Renewable Energy, no. CZ.1.05/2.1.00/01.0014 and research project, no. FEKT S-11-19.