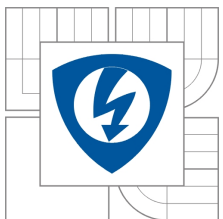


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

ELIMINACE DISKONTINUITY DODÁVKY ELEKTRICKÉ ENERGIE Z OBNOVITELNÝCH ZDROJŮ

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

DISERTAČNÍ PRÁCE
DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Ing. LUKÁŠ RADIL

VEDOUČÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. PETR MASTNÝ, Ph.D.

BRNO 2013

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

DISERTAČNÍ PRÁCE

předložená k získání akademického titulu Doktor (Ph.D.)

ve studijním oboru
SILNOPROUDÁ ELEKTROTECHNIKA A ELEKTROENERGETIKA

Ing. Lukáš Radil

ELIMINACE DISKONTINUITY DODÁVKY ELEKTRICKÉ ENERGIE Z OBNOVITELNÝCH ZDROJŮ

Školitel: doc. Ing. Petr Mastný, Ph.D.

Datum odevzdání práce: 18.11.2013

Práce je k dispozici: ve fakultní knihovně FEKT VUT v Brně, Technická 10 602 00 Brno

Obsah

Bibliografická citace	12
Čestné prohlášení	13
Poděkování	13
Abstrakt	14
Abstract	15
1 Úvod	16
1.1 Názvosloví	16
1.1.1 Kapacita	16
1.1.2 Skládání článků – baterie	17
1.1.3 Účinnost	17
1.1.4 Ostatní parametry	18
2 Současný stav	19
2.1 Aktuální situace ve světě	20
2.1.1 King Island	20
2.1.2 Enertrag	20
2.1.3 Utsira	21
2.1.4 Rokkashomura Wind Farm	21
2.2 Stav v České republice	21
2.3 Aktuální vývoj spotřeby elektrické energie	22
2.3.1 Současné možnosti a metody akumulace energie	24
3 Cíle disertační práce	30
4 Současné metody	31
4.1 Přehled metod	31
4.1.1 Metoda Marquerre	31
4.1.2 Metoda Ruths	31
4.1.3 Metody CAES a AA-CAES	32
4.1.4 Přečerpávací vodní elektrárny	33
4.1.5 Vodíková akumulace	34
4.1.6 Superkapacity	35
4.1.7 Ni-Cd akumulátory	36
4.1.8 Setrvačníky (Flywheel)	37
4.1.9 Baterie Sodium – Sulfur (NaS)	39
4.1.10 Akumulátor Na-ion	40
4.1.11 Superconducting magnetic energy storage (SMES)	40
4.1.12 Olověný akumulátor	40
4.1.13 Lithiové akumulátory	42

4.1.14	ZEBRA akumulátor	42
4.1.15	Průtokové akumulátory	42
4.1.16	Metoda kapalného vzduchu	48
4.1.17	Syntetická paliva - syntetický metan	48
4.2	Přehledová tabulka současných typů baterií k energetickému využití	48
4.3	Ostatní typy akumulátorů	50
4.4	Akumulace prostřednictvím latentního tepla	52
4.5	Aspekty a podmínky nasazení akumulčních prostředků	53
5	Model baterie	54
5.1	Představení modelovacího nástroje - software	54
5.2	Model baterie	56
5.3	Základní charakteristiky	57
5.3.1	Elektrochemický popis	57
5.3.2	Schéma modelu	66
5.4	Měřený článek	69
5.5	Zhodnocení	75
6	Podmínky pro instalaci akumulčních systémů v distribučních soustavách	76
6.1	Nasazení akumulace k potlačení ztrát	76
6.1.1	Spolehlivost	78
6.1.2	Kvalita elektrické energie	78
6.1.3	Rychlost reakce	78
6.1.4	Změna režimu	78
6.1.5	Ostatní vlastnosti	79
6.2	Využití akumulace odložení rekonstrukce vedení	80
6.2.1	Vliv akumulace na snižování zátěže vedení	81
6.3	Vanadiový zásobník	84
6.4	Omezení ztrát a úspora nákladů při výstavbě vedení	85
6.4.1	Ekonomická povaha výroby elektrické energie	85
6.5	Využití v soustavě Smart Grid – Základní pojmy	89
6.5.1	Omezení disharmonie výroby regulací spotřeby	96
7	Návrh malého akumulčního systému	98
7.1	Autonomní objekt	98
7.2	Návrh malého zásobníku pro autonomní objekt	100
7.2.1	Příklad návrhu akumulčního soustavy	100
7.2.2	Výběr akumulátoru	101
7.3	Softwarové řešení – HOMER, TRNSYS, PVSYSY	101
8	Ekonomika provozu bateriových systémů v energetické síti	106
8.1	Vymezení základních pojmů	108
8.2	Vstupní parametry modelu	108
8.3	Základní investiční pravidla	108
8.3.1	Použité ekonometrické metody	109
8.4	Vliv ceny na rozhodování spotřebitele	114
8.5	Vliv cen komodit na elektrickou energii	114
8.6	Analýza nákladů životního cyklu akumulčních systémů	114
8.7	Hodnocení investice dle LRMC	115

8.8	Vyjádření stochastického průběhu a hodnota akumulace prostřednictvím investiční matematiky	117
9	Závěr	118
9.1	Shrnutí základních poznatků	118
9.2	Závěr z předložených aspektů a podmínek použití akumulačních prostředků v sítích	119
9.3	Doporučení k nasazení zásobníků elektrické energie	121
9.3.1	Výrobní bloky	121
9.4	Cíle disertační práce a jejich splnění	121
9.4.1	Seznámení se s momentálními způsoby akumulace elektřiny	121
9.4.2	Akumulace za využití tepelných soustav	122
9.4.3	Návrh matematického modelu	122
9.4.4	Sestavení funkčního modelu	122
9.4.5	Provedení experimentálního měření	122
9.5	Přínos práce	122
9.6	Pokračování výzkumu	123
	Literatura	124
	Autorova publikační činnost	130
	Curriculum Vitae	135
	Rejstřík	135
10	Seznam příloh	137
A	Výstup z HOMER Energy	138
B	Výstup z PVSYS	146
C	Výstup z TRNSYS	152
D	Resumé nákladů jednotlivých technologií	154
E	Výstupy z monitorovací jednotky akumulátoru VRB	158
F	Porovnání průběhů ze zdrojů LiFePO_4 a Pb akumulátoru	164

Seznam obrázků

2.1	Model, který je provozován společností Enertrag ve spolupráci s firmami TOTAL a Berliner Flughafen [20]	21
2.2	Zařízení, které vyvíjí NGK Insulators a TEPCO v Japonsku [52]	22
2.3	Vývoj podílu slunečních elektráren na brutto výrobě v ČR za roky 2008 – 2012 ERU2013	22
2.4	Predikce spotřeby elektřiny v ČR [14, 53]	23
2.5	Vliv spotřeby elektrické energie při velkém nástupu elektromobilismu – I.	24
2.6	Vliv spotřeby elektrické energie při velkém nástupu elektromobilismu – II. (zdroj: MPO)	24
2.7	Vývoj spotřeby elektrické energie na vývoji HDP [29]	25
2.8	Hodnocení systémů z hlediska živostnosti podle [15] – upraveno autorem	29
2.9	Hodnocení systémů z hlediska požadavků na výkon podle [15] – upraveno autorem	29
4.1	Vývoj systému s akumulací pro sítě do roku 2040 s potřebnou akumulační dobou [12]	31
4.2	Principiální schéma [A6]	32
4.3	Principiální schéma metody Marquerre [A6]	33
4.4	Schéma zapojení akumulačního systému CAES	33
4.5	Diagram účinností přečerpávací vodní elektrárny	34
4.6	Schéma jednorozměrného setrvačnicku	37
4.7	Schéma dvojrozměrného setrvačnicku	38
4.8	Principiální schéma NaS baterie [52]	40
4.9	Nabíjecí a vybíjecí cyklus Pb akumulátorů - a) vybíjecí a b) nabíjecí [46]	41
4.10	První redoxní palivový článěk z roku 1955 [60] – upraveno autorem	43
4.11	Schematický náčrt jednoho z prvních redoxových pal. článků [60] – upraveno autorem	45
4.12	Vanadiová redukčně-oxidační baterie	46
4.13	Princip funkce akumulace prostřednictvím kapalného vzduchu	49
4.14	Integrace elektrického, tepelného a transportního systému s „ekologickým“ metanem a kapalnými palivy [54]	49
5.1	Princip jazyku Modelica [®] , vytvořeno podle [19]	55
5.2	Princip jazyku Modelica [®] s porovnáním s ostatními typy modelovacích jazyků, vytvořeno podle [19]	56
5.3	Schéma chemických dějů při nabíjení [4] – upraveno autorem	62
5.4	Grafické ztráty při nabíjení a vybíjení akumulátoru	63
5.5	Schéma elektrochemického modelu VRB [4]	65
5.6	Elektrický model VRB, podle [2] upraveno autorem	66
5.7	Model baterie vytvořený s pomocí mechanické brzdy pro nabíjení [39]	67

5.8	Model baterie vytvořený s pomocí mechanické brzdy pro vybíjení [39]	67
5.9	Model baterie vytvořený s pomocí skutečných čerpadel	68
5.10	Detailní model čerpadla	68
5.11	Základní model akumulčního schématu	69
5.12	Základní model větrné elektrárny	69
5.13	Fotografie kompletního akumulátoru VRB	70
5.14	Průběh napětí při nabíjení VRB článku	70
5.15	Pokles napětí při vybíjení VRB článku	70
5.16	Změřené napětí na pal. článku VRB při nabíjení (napětí měřené přímo na akumulátoru, vzrůst napětí je způsobeno snížením úbytku napětí v přívodním kabelu)	70
5.17	Změřené napětí na pal. článku VRB při vybíjení	70
5.18	Změřené napětí na řídicím článku VRB při nabíjení	71
5.19	Změřené napětí na řídicím článku VRB při vybíjení	71
5.20	Nabíjecí proud článku VRB	71
5.21	Vybíjecí proud článku VRB	71
5.22	Dodávaný výkon do baterie	71
5.23	Odebíraný výkon z baterie	71
5.24	Průběh veličin, který koresponduje s měřeným článkem na obr. 5.14 a 5.20	72
5.25	Průběh veličin, který koresponduje s měřeným článkem na obr. 5.15 a 5.21	72
5.26	Průběh pulsuujícího zatížení připojeného na akumulátor a pokles napětí na svorkách	73
5.27	Průběh nabíjecího napětí a proudu z větrné elektrárny do akumulátoru	73
5.28	Vybíjecí průběh při zatížení s amplitudou 80 A, periodou pulsů 1000 s šířkou pásma 60 a startovacím čase 10 s	74
5.29	Detail napětí a proudu při zapnutí akumulátoru při zátěži.	74
6.1	Zrovnoměnění diagramu zatížení	77
6.2	Klasická topologie sítě	90
6.3	Topologie sítě založená na Smart Grid	91
6.4	Model SG sítě	92
6.5	Model pro zjištění chování v malé microgrid síti [8]	92
6.6	Jednoduchý model větrné elektrárny. Jednotlivé bloky jsou tvořeny ze podbloků. [8]	92
6.7	Model reprezentující dodatečný generátor [8]	93
6.8	Model fotovoltaického panelu. Paralelní odpor je zakomponován přímo v diodě. [8]	93
6.9	Submodel pro regulaci větrné elektrárny. Ostatní regulační systémy jsou založeny na podobné filosofii [8]	93
6.10	Průběhy výstupních veličin pro jeden den	94
6.11	Detail hodnot pro druhé čtvrtletí a denní průběh	94
6.12	Akumulace tepla do mosazné tyče	96
7.1	Konfigurační rovina daná 7.5	99
7.2	Konfigurační rovina daná rozdílnými klimatickými podmínkami 7.5	99
7.3	Dimenzační křivka pro limitní přechod různých klimatických cyklů [47]	100
7.4	Stejného principu lze použít i pro návrh hybridního systému [48] – upraveno autorem	100
7.5	Grafické prostředí softwaru HOMER	102
7.6	Simulační výstup z HOMER	103
8.1	Magický trojúhelník investování	108
8.2	Grafický výstup s proměnnými parametry	110
8.3	Grafický výstup s proměnnými parametry pro metodu NPV	113
8.4	Průběh ceny silové elektřiny za poslední 3 roky (CAL – znamená kontrakt dodání)	114

8.5	Průběh ceny termického uhlí na světových trzích za poslední 3 roky	115
8.6	Průběh ceny zemního plynu USA za poslední 3 roky	115
A.1	Grafické rozhraní programu s výpisy jednotlivých kombinací	139
C.1	Pracovní prostředí softwaru TRNSYS, který je primárně vytvářen pro modelování energetických soustav	153
D.1	Typ technologie pro konkrétní systém versus současné náklady na instalaci. Počítáno pro životnost 15 roků, při ceně plynu 2,5Kč/m ³ pro metodu CAES (cena plynu v USA) a ceně 600 Kč/MWh elektřiny mimo špičku pro nabíjení Poznámka: Veškeré náklady jsou pro rok 2012, náklady se budou lišit v závislosti na místních specifických podmínkách. [57]	155
D.2	Typ technologie pro konkrétní velikost soustavy versus celkové náklady elektrárny (\$/kW), rozsah cen zahrnuje: a) technologii, b) čas akumulace, c) návratnost investice [57]	156
D.3	Typ technologie pro konkrétní systém versus úroveň nákladů na energii (\$/MWh). Počítáno pro životnost 15 roků, při ceně plynu 2,5Kč/m ³ pro metodu CAES (cena plynu v USA) a ceně 600 Kč/MWh elektřiny mimo špičku pro nabíjení Poznámka: Veškeré náklady jsou pro rok 2012, náklady se budou lišit v závislosti na místních specifických podmínkách. [57]	157
F.1	Volt-amperová charakteristika pro více zatěžovacích křivek z měření	165
F.2	Volt-amperová charakteristika s regresní funkcí z prostředí Mathematica	165
F.3	Průběh odběru proudu lithiového akumulátoru	165
F.4	Průběh odběru proudu olověného akumulátoru	165
F.5	Průběh napětí při vybíjení lithiového akumulátoru	165
F.6	Průběh napětí při vybíjení olověného akumulátoru	165
F.7	Odebíraný výkon lithiového akumulátoru	165
F.8	Odebíraný výkon olověného akumulátoru	165
F.9	Průběh nabíjecího proudu lithiového akumulátoru	166
F.10	Průběh nabíjecího proudu olověného akumulátoru	166
F.11	Průběh napětí při nabíjení lithiového akumulátoru	166
F.12	Průběh napětí při nabíjení olověného akumulátoru	166
F.13	Dodávaný výkon lithiovému akumulátoru	166
F.14	Dodávaný výkon olověnému akumulátoru	166

Seznam tabulek

2.1	Predikce výroby z obnovitelných zdrojů dle IEA (The International Energy Agency) ve Wolrd Energy Outlook 2012	26
4.1	Základní rozdělení jednotlivých typů setrvačníků	39
4.2	Porovnání základních typů průtokových baterií	43
4.3	Vlastnosti vybraných systémů s porovnáním s redoxovými soustavami [45]	43
4.4	Porovnání účinnosti vybraných technologií [5]	50
4.5	Přehledová tabulka současných typů baterií k energetickému využití	51
4.6	Srovnání elektrických vlastností baterií	52
5.1	Provozní parametry VRB článku [4]	58
5.2	Termodynamická data pro vybrané vanadiové sloučeniny při 295,15 K. Hodnoty označeny hvězdičkou jsou odhadovány. [1, 4]	59
5.3	Rozdíl vanadiových iontů a jejich odpovídajících solí, koncentrace roztoku při nabíjení a vybíjení a typ elektrolytu, ve kterém jsou rozpuštěny [4]	60
5.4	Hustota a viskozita vanadiového roztoku – údaje v závorce jsou odhadnuty z kinematické viskozity [4]	64
5.5	Hustota a viskozita vanadiového roztoku – údaje v závorce jsou odhadnuty z kinematické viskozity ze změřeného článku. Měření probíhalo při teplotě 22 °C pro hustotu a při teplotě 22,4 °C pro viskozitu	65
6.1	Aplikační synergická matice [18]	82
6.2	Souhrnná tabulka VRB systému zapojeného do regulace sítě a jeho náklady k roku 2006	85
6.3	Porovnání současných distribučních sítí se systémy Smart Grid [25]	89
7.1	Hodnoty průměrné dopadající energie na povrch pro oblast Brno	102
7.2	Hodnoty příkonu pro autonomní systém	104
7.3	Hodnoty pro akumulátor energie	104
7.4	Hodnoty fotovoltaických panelů	104
8.1	Příklad setu doplňkových služeb a jejich kategorizace [30]	107
8.2	Srovnání jednotlivých metod [33]	110

Seznam symbolů a zkratk

η_c	účinnost nabíjení	1
η_d	účinnost vybíjení	1
η_s	účinnost celková	1
$\eta_s(t)$	účinnost akumulace – samovybíjení	1
ω	úhlová rychlost	rad · s ⁻¹
ρ	hustota	kg · m ⁻³
σ	tlak	Pa
A	průřez	m ²
C	kapacita	F
C_A	korelační koeficient	1
C_s	počet dnů autonomního provozu	1
C_{norm}	normovaná kapacita	F
E	energie	J
E°	standardní potenciál	V
E_1	energie spotřebována zátěží	Wh
E_b	elektromotorické napětí baterie	V
E_{celk}	uskladněná energie	1
E'_{celk}	zbylá uskladněná energie závislá na čase	Wh
E_c	elektromotorické napětí článku	V
E_{gen}	energie vyrobená	Wh
E_{nab}	energie při nabíjení	Wh
E_n	energie článku při nabíjení	J
E_{vyb}	energie při vybíjení	Wh
E_v	energie článku při vybíjení	J

$EV A$	ekonomická přidaná hodnota	1
F	Faradayova konstanta	C.mol ⁻¹
F	síla	N
FP_n	volný peněžní tok	1
I	proud	A
i	diskontovaná míra	1
I_b	proud	A
I_c	proud článku	A
I_n	kapitálový výdaj	1
I_n	nabíjecí proud	A
I_v	vybíjecí proud	A
J	moment setrvačnosti	kg.m ²
k	koeficient	1
k_m	koeficient účasti maxima nového odběratele na maximu zatížení ES	1
k_r	koeficient zálohy výkonu v závěrných elektrárnách	1
k_{vs}	koeficient vlastní spotřeby závěrné elektrárny	1
k_{zpj}	koeficient ztrát výkonu na vedeních až do j -té napěťové hladiny	1
k_{zwj}	koeficient ztrát energie ve vedeních ES až do j -té napěťové hladiny	1
m	hmotnost	kg
N	doba životnosti	roky
n	jednotlivá doba životnosti	roky
n_{iE}	měrné investiční výdaje na výstavbu závěrných elektráren	Kč.kW ⁻¹
n_{iS}	měrné investiční výdaje na výstavbu závěrných sítí pro dopravu elektřiny k novému odběrateli	Kč.kW ⁻¹
n_p	počet článků paralelně	1
n_s	počet článků v sérii	1
n_{wE}	poměrné měrné náklady výroby elektřiny v závěrné elektrárně	Kč.kW ⁻¹
P_n	nabíjecí výkon	W
P_n	peněžní příjem	1
P_n	výkon článku při nabíjení	W

p_{psE}	poměrné provozní roční stálé náklady závěrných elektráren	1
p_{psS}	poměrné roční stálé náklady závěrných sítí	1
P_v	výkon článku při vybíjení	W
Q_n	náboj článku při nabíjení	C
Q_v	náboj článku při vybíjení	C
R	plynová konstanta	J.K ⁻¹ .mol ⁻¹
r	poloměr	m
r, T_E	poměrná anuita v závislosti na diskontní míře r a době životnosti závěrné elektrárny T_E respektive sítě T_S	1
r_e	alternativní náklad vlastního kapitálu	1
R_i	vnitřní odpor článku	Ω
T	teplota	K
T_m	roční doba využití maxima nového odběratele	h.r ⁻¹
t_v	doba vybíjení	h
U	napětí	V
U_E	referenční napětí akumulátoru	V
U_{cn}	napětí článku při nabíjení	V
U_{cv}	napětí článku při vybíjení	V
U_n	nabíjecí napětí	V
U_{OCV}	napětí otevřeného obvodu	V
v	rychlost	m. s ⁻¹
a	je aktivita určující elektrodový potenciál	mol.dm ⁻³
DOD	Depth of Discharge – hloubka vybití	1
EIA	Environmental Impact Assessment – Vyhodnocení vlivů na životní prostředí	
MES	Modular Electricity Storage	
SOC	State of Charge – stav nabití	1
v_n	obecný koeficient	1
z	počet elektronových výměn v roztoku	1

Bibliografická citace

Radil, L. *Eliminace diskontinuity dodávky elektrické energie z obnovitelných zdrojů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 166 s. Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Petr Mastný, Ph.D.

Čestné prohlášení

„Prohlašuji, že předložená práce je mým původním autorským dílem, které jsem vypracoval samostatně. Veškerou literaturu a další zdroje, z nichž jsem při zpracování čerpal, v práci řádně cituji a jsou uvedeny v seznamu použité literatury.“

Brno 18.11.2013

Lukáš Radil

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval mé Soni, která stála dlouhá léta při mně a konejšila mě při parciálních neúspěších. Dále chci poděkovat rodičům, kteří mně umožnili studovat a podporovali mě při aktivitách i mimo tuto práci.

Svému školiteli doc. Ing. Petru Mastnému, Ph.D. a vedoucímu Ústavu elektroenergetiky FEKT VUT v Brně doc. Ing. Petru Tomanovi, Ph.D. za vštěpování myšlenek, vstřícný přístup a korektury při finalizaci práce. Zvláštní poděkování patří kolegovi, kamarádovi Ing. Janu Macháčkovi, Ph.D. za cenné rady při psaní textu a všeobecně za utváření dobré nálady. Díky!

Brno 18.11.2013

Lukáš Radil

Abstrakt

Disertační práce se zabývá oblastí akumulace elektrické energie. Snaží se definovat všechny dostupné metody akumulace, které jsou využitelné v průmyslových aplikacích a současně definovat podmínky využití akumulčních systémů v elektrizačních soustavách s rozšířenou penetrací obnovitelných zdrojů. V souvislosti se současným vývojem v této oblasti je podrobně analyzován jeden z perspektivních akumulčních systémů – Vanadová Redoxní Baterie (VRB). Jedním z výstupů této práce je také ekonomicko-energetická analýza definovaných akumulčních systémů, která je zpracována s ohledem na disproporce mezi výrobou a spotřebou energie. Práce vznikla za podpory Centra výzkumu a využití obnovitelných zdrojů energie, číslo CZ.1.05/2.1.00/01.0014 a výzkumného projektu FEKT S-11-9.

Klíčová slova

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

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 (CVVOZE) no. CZ.1.05/2.1.00/01.0014 and research project no. FEKT S-11-9.

Key words

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

Kapitola 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.

1.1 Názvosloví

Velice důležité je ujasnit si názvosloví, které následujícím textu využito. Některé veličiny, například kapacita akumulátoru a kondenzátoru, jsou často nesprávně zaměňovány. Následující text proto vysvětluje důležité pojmy, které jsou s akumulací elektrické energie spojeny.

1.1.1 Kapacita

Množství elektřiny se udává v jednotce ampérhodina (Ah). To znamená, že velikost 1 Ah vyjadřuje průchod proudu o velikosti 1 A za 1 h. Jestliže proud je kolísavý, potom se bere střední hodnota proudu. Kapacita je tedy množství elektřiny, které je schopné dodat akumulátor opakovaně. Tuto skutečnost můžeme popsat následující rovnicí (1.1):

$$Q = I_v t_v \quad (\text{Ah}), \quad (1.1)$$

kde

$I_v \dots$ je vybíjecí proud (A),

$t_v \dots$ je doba vybíjení (h).

Někdy se stává, že pojem kapacita akumulátoru je zaměňována s pojmem kapacita kondenzátoru. Jedná se o dvě naprosto odlišné veličiny. Kapacita kondenzátoru je poměr elektrického náboje vůči napětí. Její jednotkou je Farad (F). Elektrická kapacita je označena písmenem C .

Rozlišujeme měrnou kapacitu podle hmotnosti (Ah.kg^{-1}) a měrnou kapacitu podle objemu (Ah.l^{-1}). Obě veličiny slouží k porovnání akumulátorů z hlediska praktického využití.

Pokud vynásobíme ampérhodiny napětím akumulátoru, obdržíme kapacitu akumulátoru vyjádřenou wattodinami (Wh). Z toho jsou i odvozeny měrné kapacity objemové (Wh.l^{-1}) a hmotnostní (Wh.kg^{-1}). Kapacita je také ovlivněna některými faktory, které mají vliv na snížení její hodnoty. Jedná se zejména o teplotu a vlhkost prostředí. Podmínky, při kterých je akumulátor provozován, jsou často odlišné od výrobcem udávaných normalizovaných hodnot.

1.1.2 Skládání článků – baterie

V současnosti využívané články můžeme rozdělit do dvou základních skupin:

- primární články,
- sekundární články.

Primární články jsou tvořeny galvanickými články, které neumožňují opětovné nabíjení. Jedná se o všeobecně známé zdroje stejnosměrného napětí a proudu. Sekundární články jsou akumulační články, do kterých se zahrnují všechny chemické zdroje a mohou být opakovaně nabíjeny a vybíjeny (například kyselinovo olověný článek). Elektromotorické napětí jednotlivých článků je velice nízké. Proto jsou články zapojovány sériově nebo paralelně včetně jejich kombinací. Soubor těchto článků můžeme nazvat akumulátorovou baterií. Z tohoto důvodu jsou často zaměňovány pojmy baterie (myšlen galvanický článek) a akumulátorová baterie. Mezi neodbornou veřejností je pojem baterie zažitý zejména pro galvanické články. Výsledné napětí při sériovém zapojení (proud je stejný) je:

$$E_b = n_s E_c \quad (\text{V}), \quad (1.2)$$

kde

$n_s \dots$ je počet článků v sérii,

$E_c \dots$ je elektromotorické napětí článku.

Výsledný proud při paralelním zapojení (napětí je stejné) je:

$$I_b = n_p I_c \quad (\text{A}), \quad (1.3)$$

kde

$n_p \dots$ je počet článků paralelně,

$I_c \dots$ je proud článku.

Při zapojení článků s nestejnou velikostí kapacity se při sériovém zapojení vybije dříve článek s nižší hodnotou. Je to dáno právě tím, že proud obvodu je stejný pro všechny články. Tím dochází ke snížení napětí celé baterie. U paralelního zapojení je častým jevem vyrovnávací proud, který kompenzuje rozdílná elektromotorická napětí jednotlivých článků. Proto je vždy důležité řadit články se stejným napětím, vnitřním odporem a kapacitou.

1.1.3 Účinnost

Účinnost akumulátoru je definována jako poměr energie, která je nutná při nabíjení ku energii získané z akumulátoru. Výkon je potom definován:

$$P_n = U_n I_n \quad (\text{W}), \quad (1.4)$$

kde

$U_n \dots$ je nabíjecí napětí (V), $I_n \dots$ je nabíjecí proud (A).

Při uvažování vnitřních odporů můžeme napsat:

$$P_n = E_c I_n + R_i I_n^2 \quad (\text{W}), \quad (1.5)$$

kde

$R_i \dots$ je vnitřní odpor článku (Ω).

Část výkonu je využita ke krytí ztrát. Pokud budeme uvažovat účinnost akumulátoru vyjádřenou v ampérhodinách, bude vždy větší než ve watthodinách. Je to způsobeno napětím. Watthodinová účinnost závisí na střední hodnotě nabíjecího i vybíjecího napětí a proudové účinnosti [3].

1.1.4 Ostatní parametry

O ostatních parametrech, zvláště ve vztahu ke konkrétním druhům akumulačních prostředků, pojednávají kapitoly dále. Rozložení energií a jejich ztráty ilustruje například obrázek 5.4.

Přesto:

Účinnost nabíjení:

$$\eta_c = \frac{E_{celk}}{E_{nab}} \quad (1.6)$$

Účinnost udržení energie v akumulátoru – samovybíjení:

$$\eta_s(t) = \frac{E'_{celk}}{E_{celk}} \quad (1.7)$$

Účinnost vybíjení:

$$\eta_d = \frac{E'_{celk}}{E_{vyb}} \quad (1.8)$$

Celková účinnost akumulátoru:

$$\eta_s = \frac{E_1}{E_{gen}} = \frac{E_{vyb}}{E_{nab}} \quad (1.9)$$

Celkovou účinnost akumulátoru můžeme následně definovat prostřednictvím jednotlivých účinností jako:

$$\eta_s = \eta_s(t) \eta_c \eta_d \quad (1.10)$$

Podle Ter-Gazariana [66] můžeme pro energetické ztráty napsat následující rovnici:

$$\delta E_{celk} = \frac{E_{nab} - E_{vyb} = E_{celk}}{\eta_c / E_{vyb}} = \frac{E_{celk}(1 - \eta_c E_{vyb} / E_{celk})}{\eta_c} = \frac{E_{nab}(1 - \eta_s(t) \eta_c \eta_d)}{\eta_c} \quad (1.11)$$

Po úpravě:

$$\delta E_{celk} = \frac{E_s(1 - \eta_s)}{\eta_c} \quad (1.12)$$

Kapitola 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). Nenašel 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 [28] 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 (více o regulaci sítě například v kapitole 8 na straně 106).

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 akumulárního média se většinou uvažuje nahrazení původního zdroje, popřípadě jeho spotřeby pohonných hmot před instalací akumulátoru a po něm.

V ostrovních soustavách je často využíván diesel generátor. V následujícím textu je uveden přehled několika nejznámějších typů akumulárních zařízení a dosavadní zkušenosti s jejich provozem.

2.1.1 King Island

Ostrov, který je v blízkosti Austrálie (Tasmánie). Je zde umístěna jedna z prvních instalací průtokového akumulárního zařízení na principu VRB (více na straně 42). Zařízení pracuje (od roku 2003) v kombinaci s větrnou a fotovoltaickou elektrárnou. Snížilo razantně spotřebu naftového agregátu (z 4,5 mil. litrů na 2,6 milionu litrů), který do té doby zastával funkci náhradního zdroje.

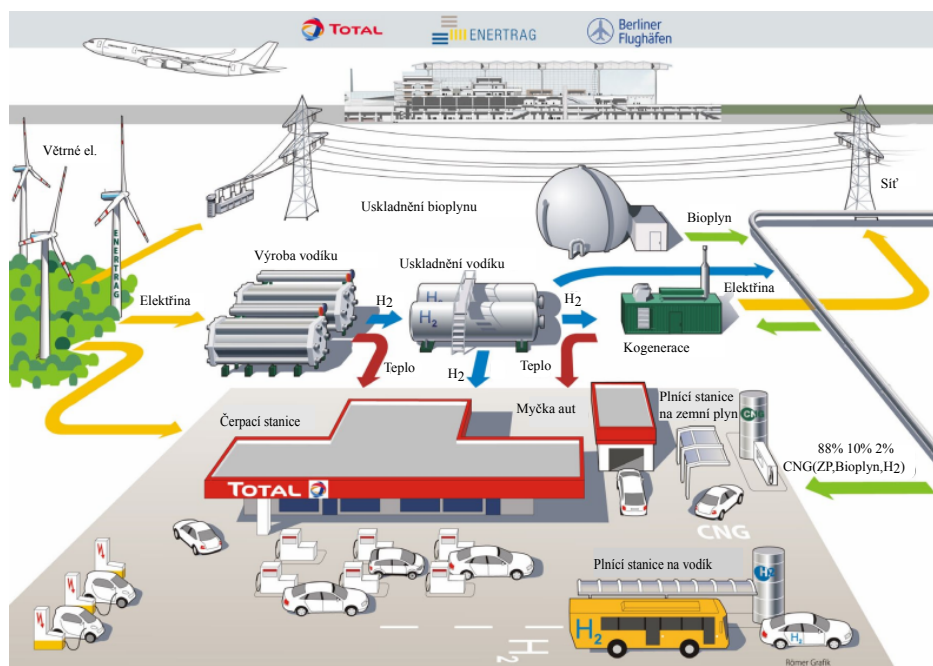
2.1.2 Enertrag

Enertrag je Německá skupina, která rozvíjí metodu vodíkového cyklu. Viz obrázek 2.1. Pilotní projekt byl uveden do provozu v říjnu 2011 pod názvem elektrárna Prenzlau. Jedná se o blok tří větrných elektráren s jednotkovým výkonem 3 MW a 500 kW elektrolýzní jednotku, která vyrábí vodík, jenž může být spalován s bioplynem v kogenerační jednotce. Na jednotce spolupracuje s přední energetikou v Evropě – Vattenfall Europe. Více informací lze získat například na stránkách skupiny Enertrag.

¹Tuto 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.

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

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



Obr. 2.1: Model, který je provozován společností Enertrag ve spolupráci s firmami TOTAL a Berliner Flughafen [20]

2.1.3 Utsira

Utsira je město v severním Norsku, které přešlo na kompletní zásobování pomocí obnovitelných zdrojů. Jako akumulační médium využívá vodíkových cyklů s palivovými články. Projekt sestává z jedné turbíny, která zásobuje externí síť. Druhá má snížený výkon na 150 kW. Je napojena na systém se skladování elektřiny. Tento systém je sestavou setrvačníku s kapacitou 5 kWh a 100 KVA synchronním strojem, kterými jsou regulovány frekvence a napětí v síti. Pro nadbytek výroby je nainstalován elektrolyzátor s kapacitou $10 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ s maximálním příkonem 48 kW, dále 5 kW kompresor a nádrže s objemem 2400 Nm^3 s tlakem 200 bar. Pokud je bezvětří, je vodík spalován v motoru MAN s výkonem 55 kW a v 10 kW palivových článcích. Zařízení provozuje společnost Statoil. Zařízení je čistě výzkumné a je v provozu od roku 2008.

2.1.4 Rokkashomura Wind Farm

Jedná se větrnou farmu, která je provozována v Japonsku společností Japan Wind Development od roku 2008. Instalovaný výkon větrné farmy je 51 MW a jedná se o největší instalaci větrné farmy a akumulace elektřiny, jež je prováděna v zásobních NaS (viz kapitola 4.1). Výkon akumulátorů je 34 MW a kapacita je 238 MWh. Park sestává z celkem 34 větrných turbín s jednotkovým výkonem 1,5 MW a 17 sety akumulátorů s jednotkovým výkonem 2 MW. Podle prvních zkušeností je velice dobrá účinnost akumulačních soustav, a to (89 – 92) %.

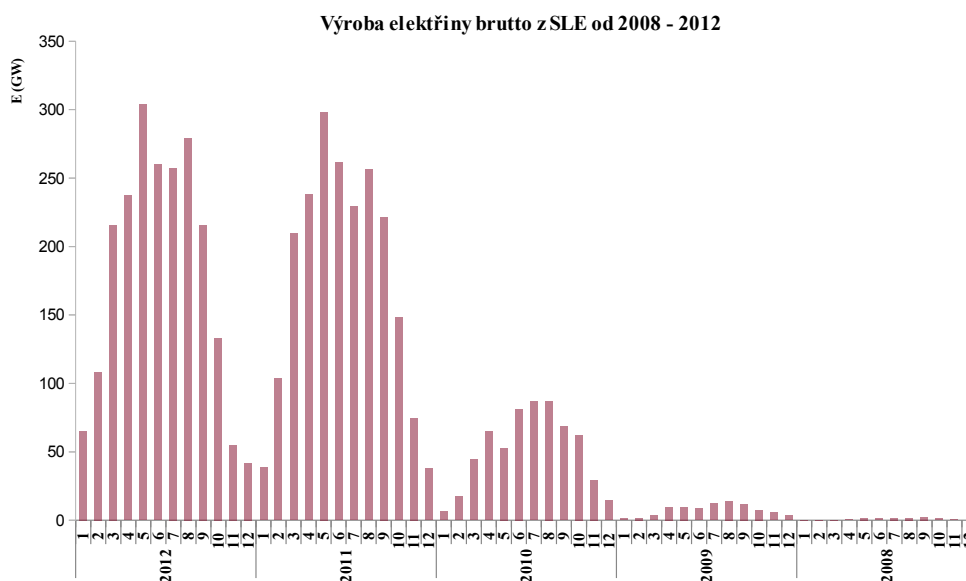
2.2 Stav v České republice

Hrubá spotřeba elektřiny v České republice v roce 2012 byla 70,44 TWh. Podíl výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů na hrubé spotřebě elektřiny činil 11,43 % (Metodika výpočtu je dána Směrnicí 2001/77/ES). Pro porovnání například s rokem 2004 činil podíl 3,8 % [16]. Data z roku 2013, zatím nejsou k dispozici. Ale jak můžeme vidět z grafického zobrazení na obr. 2.3, došlo k radikál-



Obr. 2.2: Zařízení, které vyvíjí NGK Insulators a TEPCO v Japonsku [52]

nímu navýšení výroby elektřiny z FVE a tím pádem i k vyššímu zatížení místních sítí stochastickou výrobou elektřiny.



Obr. 2.3: Vývoj podílu slunečních elektráren na brutto výrobě v ČR za roky 2008 – 2012 ERU2013

2.3 Aktuální vývoj spotřeby elektrické energie

Spotřeba elektrické energie závisí zejména na hospodářském cyklu a struktuře ekonomiky dané země. Celkové podíly na hrubém domácím produktu (HDP) respektive na hrubém domácím důchodu (HDD) (někdy je ještě udávána míra hrubé přidané hodnoty – HPH) u jsou elektřiny v posledních letech stagnující nebo s mírným poklesem. Jak ilustruje grafické vyjádření na obrázcích 2.4 a 2.5. Problém tedy je, čím docílit pokrytí spotřeby elektřiny a kompenzovat tak její spotřebu.

V České republice se na přelomu roků 2011 – 2012 předpokládaly dva hlavní scénáře vývoje spotřeby elektrické energie:

- nízký,
- vysoký.

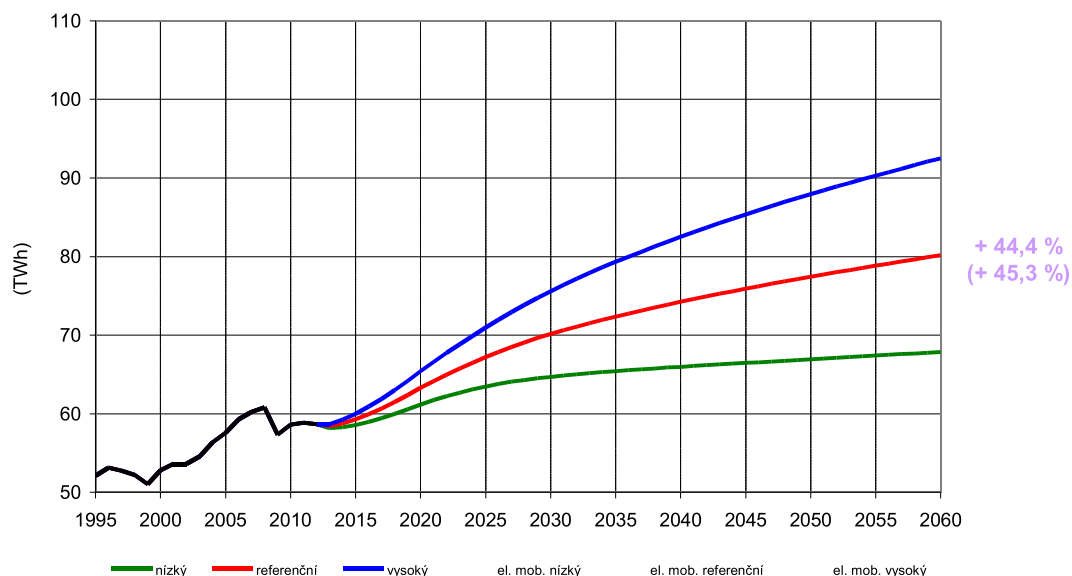
Nízký scénář v roce 2020:

- 20 % elektromobilů/hybridů,
- 1.000.000 elektromobilů/hybridů,
- nájezd 10.000 km.rok⁻¹,
- minimální průměrná spotřeba 0,2 kWh.km⁻¹.

Vysoký scénář v roce 2050 podle doporučení OECD:

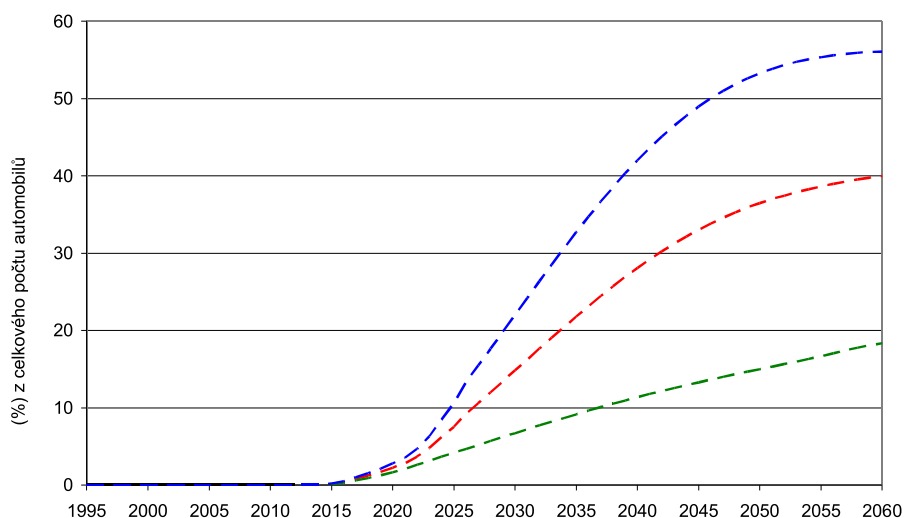
- snížení emisí CO₂ o 95 %,
- 100 % čisté mobility,
- 5.000.000 elektromobilů/hybridů,
- nájezd 20.000 km.rok⁻¹,
- minimální spotřeba 0,3 kWh.km⁻¹.

Na základě těchto predikcí byly vytvořeny grafy, které názorně zobrazují předpokládaný vývoj.

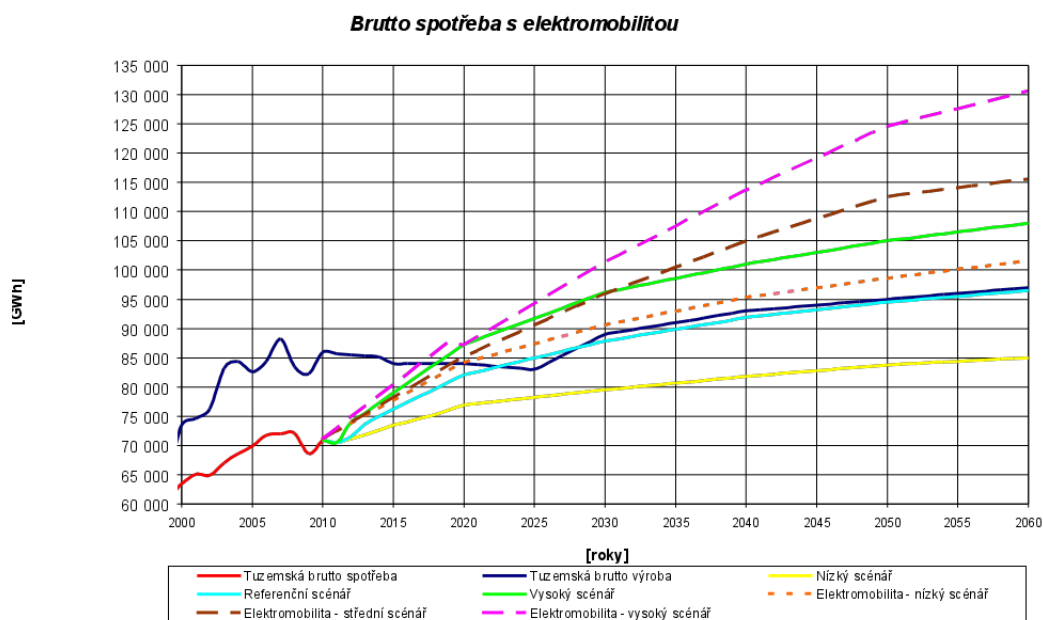


Obr. 2.4: Predikce spotřeby elektřiny v ČR [14, 53]

Predikce spotřeby elektřiny je závislá zejména na zavádění elektromobilů do provozu. U této skupiny spotřebičů je skutečný předpoklad velkého až skokového vzrůstu spotřeby elektřiny. Pokud ale v blízké době nedojde ke zvýšení počtu elektromobilů lze se domnívat, že vzrůst spotřeby elektřiny bude velmi mírný nebo dokonce záporný – tedy, že bude klesat. Podobný vývoj je právě v Německu, kde stoupající HDP není vyváženo stoupající spotřebou (jak předpokládají např. 2.4), ale stagnací.



Obr. 2.5: Vliv spotřeby elektrické energie při velkém nástupu elektromobilismu – I.



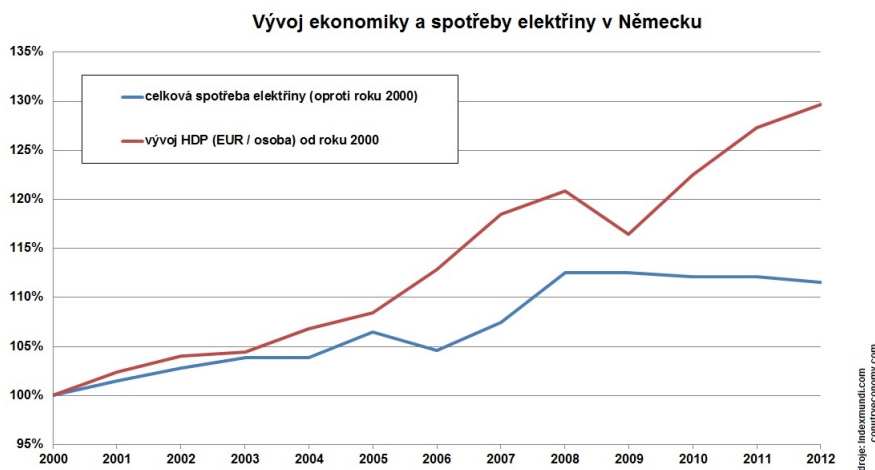
Obr. 2.6: Vliv spotřeby elektrické energie při velkém nástupu elektromobilismu – II. (zdroj: MPO)

2.3.1 Současné možnosti a metody akumulace energie

V severských zemích jako jsou Norsko nebo Švédsko není problém akumulace tolik naléhavý, protože problémy s dodávkami elektřiny lze řešit rychlými vodními elektrárnami. Potíže naopak nastávají, pokud v ES převažují tepelné elektrárny velkého výkonu. Jsou ve skrze pomalejší a mají omezený rozsah regulace. Dalším negativem je zhoršená bilance CO₂ [42, 43]. Akumulace probíhá pouze prostřednictvím přečerpávacích vodních elektráren. Tepelná energie je uchovávána zejména v horkovodech v teplárenských okruzích [42].

Vliv decentralizované výroby elektřiny na zásobovací systém

Značný nárůst výroby elektřiny z vodních, větrných a jiných obnovitelných zdrojů, včetně blokových tepláren, vyvolává řadu otázek, kterými se zabývala již CIGRE ve zprávě 139/99. Formulovala především pojem decentralizovaná výroba elektřiny. Nejsou to centrálně plánované výroby,



Obr. 2.7: Vývoj spotřeby elektrické energie na vývoji HDP [29]

ani nejsou v současné době zahrnuty do plánovaného nasazování elektráren, respektive nejsou integrovány do rozdělení zatížení velkých systémů, zpravidla mají výkon menší než 50 až 100 MW [42, 43].

Lze konstatovat, že disperzní zdroje jsou z hlediska uplatnění na trhu něčím novým. Např. kogenerace se úspěšně implementovala do regionální sítě. Její výhodou je, že umožňuje výrobu elektrické energie, tepla i chladu při relativně velmi dobré ceně. Určitým problémem, zejména u větrných elektráren, je gradient větrného výkonu, který nelze předpovídat s dostatečnou přesností. Jak uvádí [42, 43], vlivem regionálních větrných poruch atmosféry lze očekávat změny výkonů v řádech stovek megawattů, které termickými elektrárnami není možné uregulovat. Tento vývoj se dá předpokládat zejména v západní Evropě, kde se počítá s velkou výstavbou offshore (na volném moři – mimo pevninu) elektráren.

Po dynamickém nárůstu instalovaného výkonu fotovoltaických elektráren ke konci roku 2010, které neodpovídalo dříve schválenému Národnímu akčnímu plánu, došlo v České republice k útlumu výstavby FVE. V současné době (k 1.6.2013) je instalovaný výkon FVE 2128 MW. U větrných elektráren je to 261,1 MW. Další obnovitelné zdroje (biomasa, bioplyn, geotermální, vodní aj.) nemají velký vliv na chování sítě (jejich výroba nepodléhá rychlému cyklování jako například u FVE, naopak jejich predikovatelnost je velmi dobrá). Proto se nepočítá ani s jejich začleněním do akumulčních možností.

V tabulce 2.1 je zachycen předpokládaný světový vývoj jednotlivých zdrojů elektrické energie.

Základní popis a problematika akumulace

Na následujících obrázcích 2.8 a 2.9 jsou schematicky znázorněny systémy akumulace energie současnými metodami. Jak můžeme vidět, možnosti jsou celkem čtyři, včetně tepelné akumulace. Základním prvkem je v současnosti nejpoužívanější technologie přečerpávacích vodních elektráren (PVE). Pro jejich výstavbu jsou nutné vhodné geologicko-hydrologické podmínky. V České republice je koncepce PVE ukončena výstavbou elektrárny Dlouhé Stráně. S dalším rozvojem se dále počítá (například plán na stavbu elektrárny propojující povodí Vltavy a Dunaje byl zastaven, ale uvažuje se o přestavbě vodního díla Orlík na PVE – již v řízení EIA – a dále je plánovaná PVE v oblasti Orlických hor). Systémy CAES nebo AA-CAES jsou systémy založené na tlakovém vzduchu, který je vháněn do podzemních kaveren. Druhý ze systémů je tzv. adiabatický, neboli „bezztrátová“ komprese vzduchu. Vzduch je poté spalován ve spalovacích komorách se zemním plynem a šetří se tedy energie k pohonu kompresorů.

Tab. 2.1: Predikce výroby z obnovitelných zdrojů dle IEA (The International Energy Agency) ve World Energy Outlook 2012

		Nová politika		Současná politika		450	
	2010	2020	2035	2020	2035	2020	2035
Tradiční biomasa (Mtoe)	751	761	687	764	697	748	653
<i>Podíl na celkové biomase (%)</i>	59	50	37	51	40	48	29
Produkce elektřiny (TWh)	4206	6999	11342	6648	9627	7443	15293
Bioenergie	331	696	1487	668	1212	750	2033
Vodní	3431	4513	5677	4390	5350	4658	6263
Větrná	342	1272	2681	1148	2151	1442	4281
Geotermální	68	131	315	118	217	150	449
Solární FVE	32	332	846	282	524	376	1371
Koncentrační solární	2	50	278	39	141	61	815
Mořská	1	5	57	3	32	6	82
<i>Podíl na celkové produkci (%)</i>	20	25	31	23	24	28	48
Tepelné požadavky (Mtoe)	337	447	604	429	537	461	715
Průmysl	207	263	324	258	308	263	345
Stavebnictví ¹ a zemědělství	131	184	280	170	229	198	370
<i>Podíl na celkové produkci (%)</i>	10	12	14	11	12	13	19
Biopaliva ² (mboe/d)	1,3	2,4	4,5	2,1	3,7	2,8	8,2
Pozemní Doprava	1,3	2,4	4,4	2,1	3,6	2,8	6,8
Letecká doprava	–	–	0,1	–	0,1	–	0,8
Ostatní ³	–	–	0,0	–	0,0	–	0,6
<i>Podíl na celkové produkci (%)</i>	2	4	6	4	5	5	14

¹ Vylučuje tradiční biomasu,² Vyjádřeno v energetickém objemovém ekvivalentu pro diesel a benzin,³ Ostatní zahrnuje mezinárodní zásoby

Vysvětlivky:

- Nová politika – Scénář ve World Energy Outlook, který bere v úvahu široké politické závazky a plány, které byly oznámeny v zemích (včetně vnitrostátních závazků) ke snížení emisí skleníkových plynů a plány k vyřazení fosilních energetických dotací, a to i v případě, že opatření k realizaci těchto závazků musí být ještě identifikovány nebo oznámeny. To do značné míry slouží jako základního scénáře IEA.
- Současná politika – Scénář World Energy Outlook 2010, který předpokládá, že žádné změny v politice od středového bodu roku vydání (dříve nazývané referenční scénář).
- 450 – 450 Scénář: scénář předložený v World Energy Outlook, která stanovuje energetickou dráhu v souladu s cílem omezit globální nárůst teploty do 2°C omezením koncentrace skleníkových plynů v atmosféře na zhruba 450 ppm CO₂.

Kompletní soustavy jsou stále ve zkušebním provozu, i když v Německu a USA jsou v provozu zdroje již několik desítek let. Z elektrochemických systémů můžeme uvést možnost akumulace energie prostřednictvím redukčně oxidačního cyklu zvaným REDOX. V současné době má vanadiový a zinek-bromový systém vysoký vývojový potenciál. Ostatní typy systémů jsou ve fázi výzkumu. Soustavy s využitím vodíku jako nosiče energie jsou dle odborné veřejnosti nerozumné. Vodík není palivem, pouze prostředníkem v energetické výměně. Energetická bilance není příliš velká, započítáme-li účinnost konverzí z elektřiny na vodík a zpět, obdržíme celkovou hodnotu okolo 30 % [A8]. Jestli použijeme pro výrobu elektřiny klasický tepelný oběh, je celková bilance ještě horší. Nehledě na složitou infrastrukturu, která je s vodíkem spojená. Tudíž pro malé aplikace,

jako jsou VTE nebo FVE, nemá smysl uvažovat o nasazení tohoto systému. Je to drahá metoda s malou účinností. Jestliže přesto budeme přemýšlet o aplikaci vodíku jako akumulčního média, nesmíme opomenout HTR reaktory (stále ve vývoji). K rozkladu vody se používá vysoké teploty a pomocí chemicko-technologických prostředků je dosaženo lepší souhrnné bilance. Další velkou skupinu akumulace tvoří především akumulování do teplé vody, popřípadě do jiných médií. Například rozpuštěný parafin, solné hydráty, led, železo a skála.

Akumulační soustavy můžeme rozdělit podle:

- požadovaného výkonu:
 - okamžitý,
 - záložní,
- akumulční kapacity:
 - malá,
 - střední,
 - velká,
- fáze přeměny při akumulaci:
 - homogenní,
 - heterogenní,
- počtu cyklů:
 - denní,
 - týdenní,
 - celoroční,
 - nepravidelná,
- formy ukládání energie:
 - přímou,
 - nepřímou,
- rychlosti a reakční rychlosti u nabíjení a vybíjení:
 - pomalá,
 - rychlá.

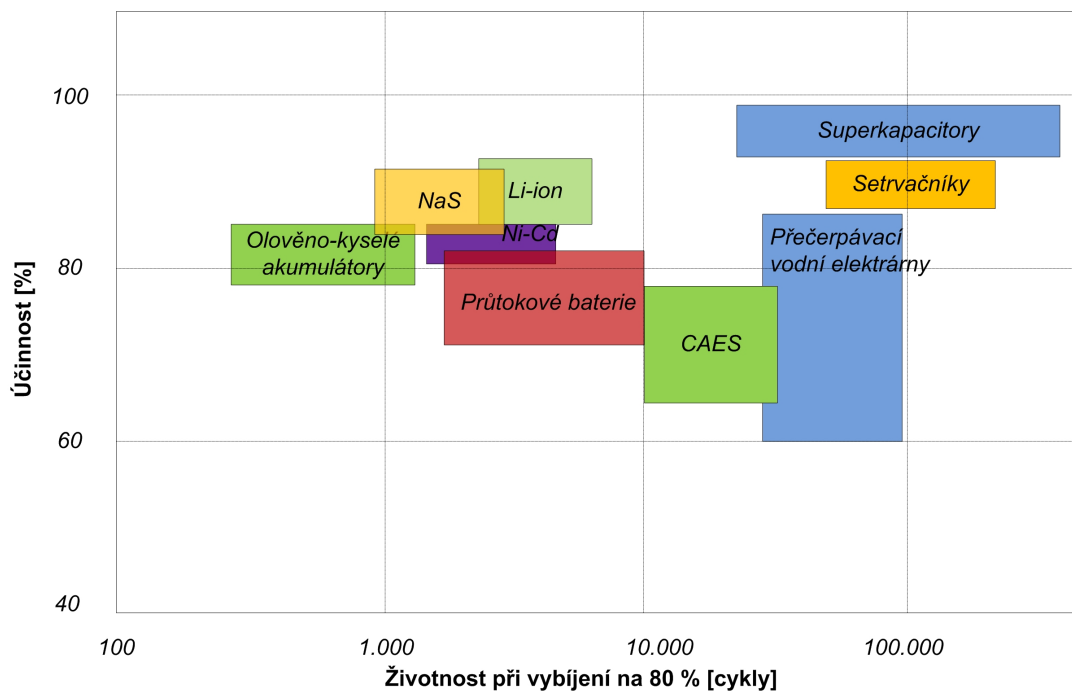
Následně lze akumulátory rozdělit do dvou skupin:

- na okamžitý vysoký výkon,
- na velkou měrnou elektrickou kapacitu.

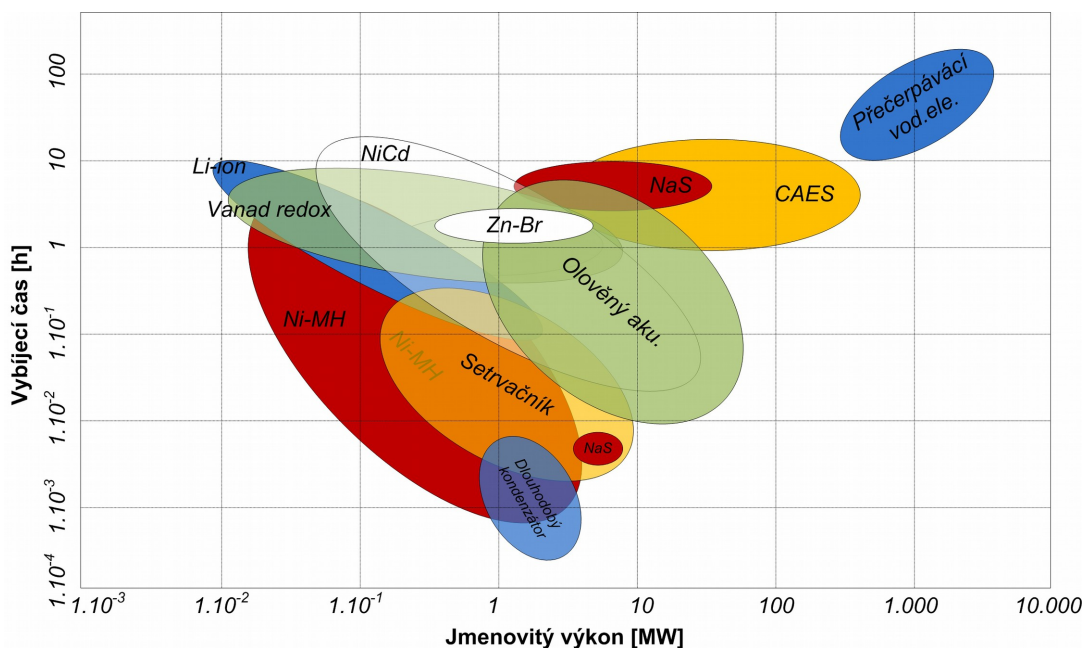
Okamžitý výkon je důležitý z hlediska krátkodobých výpadků, popřípadě nutných záskoků (mezi ně můžeme počítat například velké startovací baterie, kde je potřeba velkých proudů po relativně krátkou dobu). Velká elektrická kapacita pak následně umožňuje převzít dodávku energie místo okamžitého výkon. Jedná se především o velké celky, které nejsou schopné okamžitých reakcí (pokles napětí v síti a otočení směru proudu) v řádech sekund. Celkový výčet těchto zdrojů je uveden níže.

- Do první skupiny akumulátorů lze zařadit podle obrázku 4.2:
 - setrvačníky (flywheel),
 - energii magnetického pole (SMES),
 - superkondenzátory, ultrakondenzátory (Supercapacitors)
 - baterie.
- Do druhé skupiny patří metody:
 - přečerpávací vodní elektrárny,
 - systém stlačeného vzduchu (CAES),
 - vodíkové soustavy,
 - průtokové baterie (vanadiová báze nebo zinek-brom).

Jiné rozdělení systémů můžeme provést členit také podle aspektů uvedených na obrázku 2.8 nebo 2.9:



Obr. 2.8: Hodnocení systémů z hlediska životnosti podle [15] – upraveno autorem



Obr. 2.9: Hodnocení systémů z hlediska požadavků na výkon podle [15] – upraveno autorem

Kapitola 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:

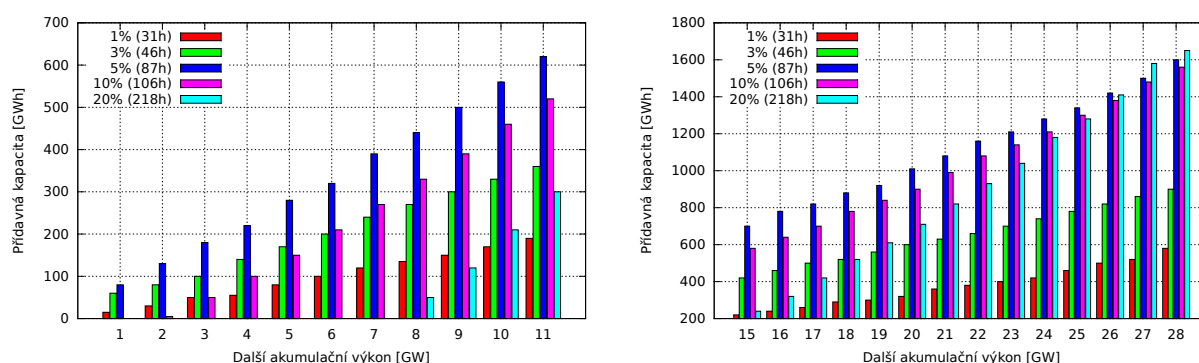
1. podrobně analyzovat současný stav dostupných technologií pro akumulaci elektrické energie a vybrat technologie vhodné pro akumulaci v elektroenergetice,
2. definovat možnosti realizace akumulčních soustav na bázi tepelné techniky vhodných ve spojení s konvenční energetikou a elektrárenstvím,
3. navrhnout matematický model a vybrat vhodné výpočetní prostředí pro následné výpočty,
4. sestavit funkční vzorek akumulčního 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.

Kapitola 4

Současné metody

4.1 Přehled metod

Níže popsané metody představují výběr ze základních a v současné době realizovatelných soustav s cílem efektivního začlenění decentralizované výroby elektřiny zejména z obnovitelných zdrojů (obrázek 4.2). Ukazuje se, že akumulace tepla je v době využívání fosilních paliv stále nedocněna. I pouhé využití tepelné energie země prostřednictvím geotermálních systémů je obrovským akumulacním potenciálem.



Obr. 4.1: Vývoj systému s akumulací pro síť do roku 2040 s potřebnou akumulací dobou [12]

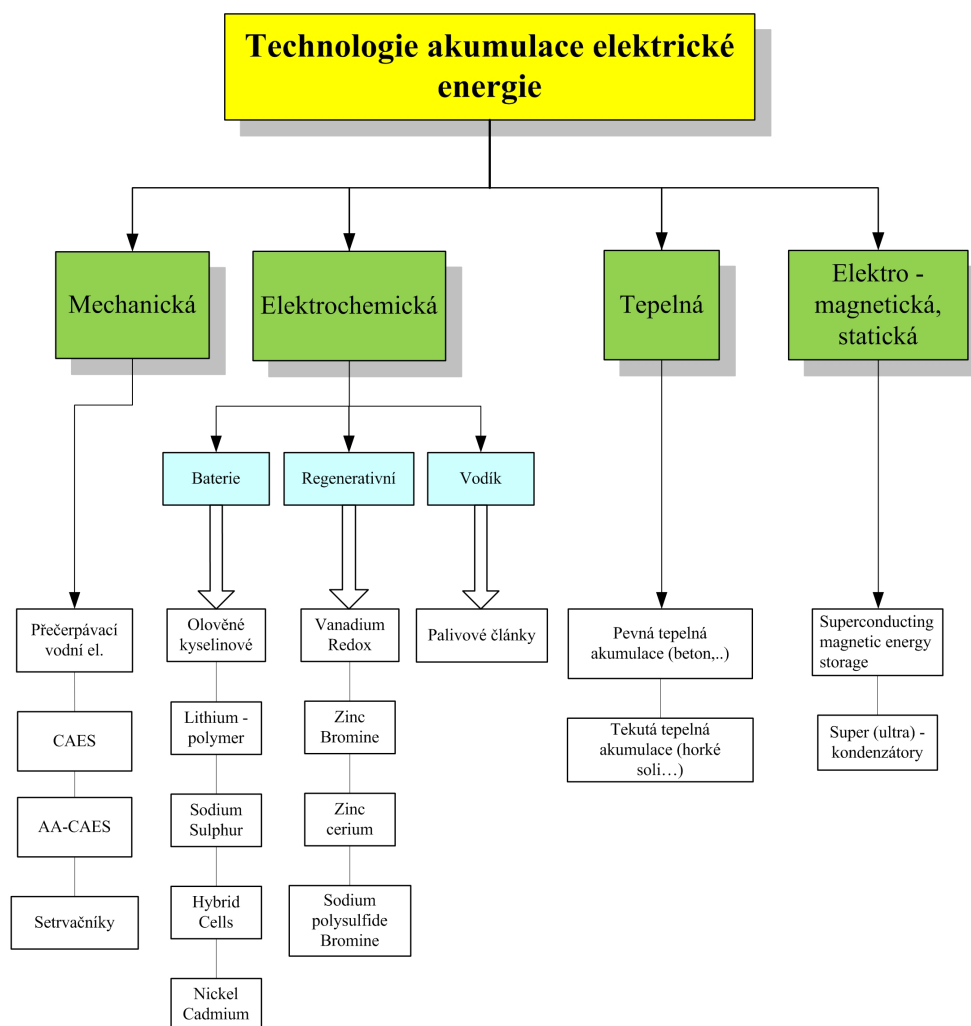
Význam akumulace roste úměrně s tím, jak narůstá podíl OZE v elektrizační soustavě. Pakliže v současné době nejsme schopni přizpůsobovat poptávku elektřiny její výrobě (vítr, Slunce), je akumulace do budoucna více než důležitá. Na následujícím grafu 4.1 je jasně patrný vzestup potřeby akumulace do roku 2040. Jedná se o stovky GWh, které je nutno odklonit z okamžité dodávky v síti.

4.1.1 Metoda Marquerre

Historická metoda, která je založena na termální akumulaci elektrické energie prostřednictvím teplé vody. Ta je posléze přes regenerační oběh kondenzované vody z turbíny zpět využita. Tento systém se vyznačuje vysokou mírou efektivity a akumulací kapacity [67, A6].

4.1.2 Metoda Ruths

V roce 1913 byl patentován systém, který pracoval s rozdílným tlakem. Jeho vynálezce Dr. Ruths, postavil první systém v Malmö. Měl výkon 50 MW a kapacitu 67 MWh [67]. Princip této soustavy je, že nepoužívá přebytek elektřiny pro meziohřev jako u Marquerreho. Její princip spočívá v tom,



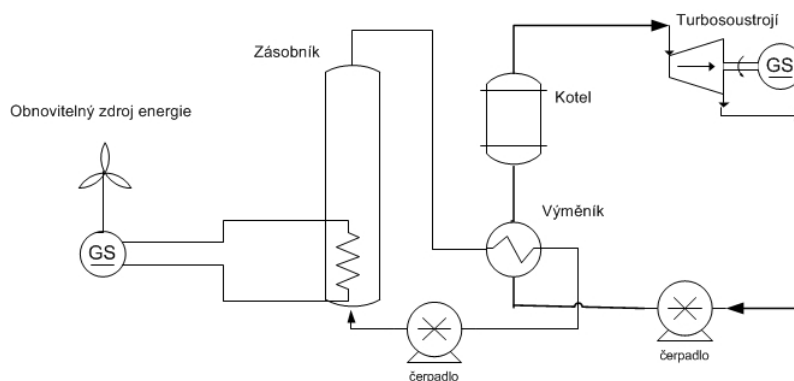
Obr. 4.2: Principiální schéma [A6]

že mezi dvě nádrže s různým tlakem se zapojuje střídavě tepelné čerpadlo, které je poháněno přebytečnou energií a elektrický agregát, který vyrábí v době špičky přídavnou elektrickou energií. Praktické využití je silně ovlivněno technickými problémy při velkých výkonech [55].

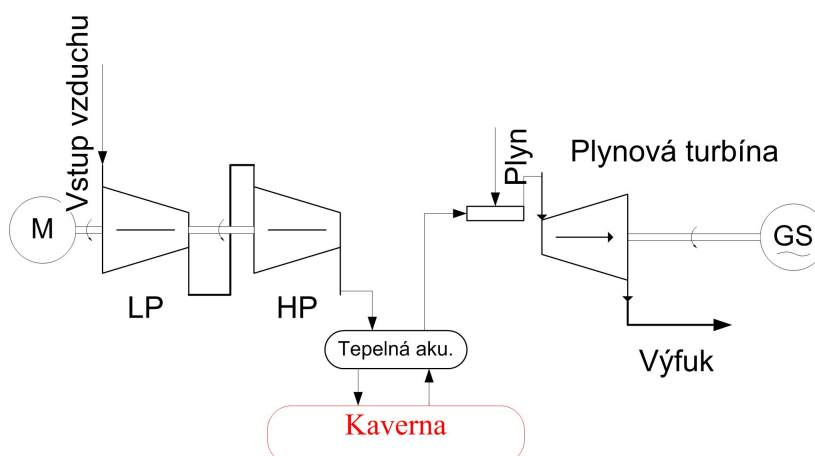
4.1.3 Metody CAES a AA-CAES

První pokusy akumulovat elektřinu pomocí stlačeného vzduchu vznikly již poměrně dávno. Pneumatický systém Djórdjević pracoval pouze s tlakovými lahvemi. Až později se metoda začala prosazovat pod zkratkou CAES (Compressed Air Energy Storage), není však příliš známá. Ani její vylepšená varianta AA-CAES (Adiabatic Advanced - Compressed Air Energy Storage) není rozšířená, protože největšími problémy jsou adiabatická komprese a úspěšné začlenění systému do místních podmínek. Oba tyto systémy jsou příležitostí pro expanzi OZE. Účinnost systému je mezi (60 – 75)%. Tato metoda je podobná svým technologickým rozsahem k přečerpávacím vodním elektrárnám.

Ve světě již běží úspěšné projekty využívající tento typ akumulace energie (McIntosh, USA; Huntorf, Německo [10]). Obě instalace pracují se systémem, ve kterém je stlačený vzduch přiváděn do spalovací komory, ve které je spalován zemní plyn. Zvýšená entalpie spalin pohání plynovou turbínu (dle Ericssonova-Braytonova cyklu), jenž vytváří následný točivý moment na hřídeli. Tlakovým vzduchem se dosahuje úspora energie k pohonu kompresoru. Dalšího zvýšení entalpie je



Obr. 4.3: Principiální schéma metody Marquerre [A6]



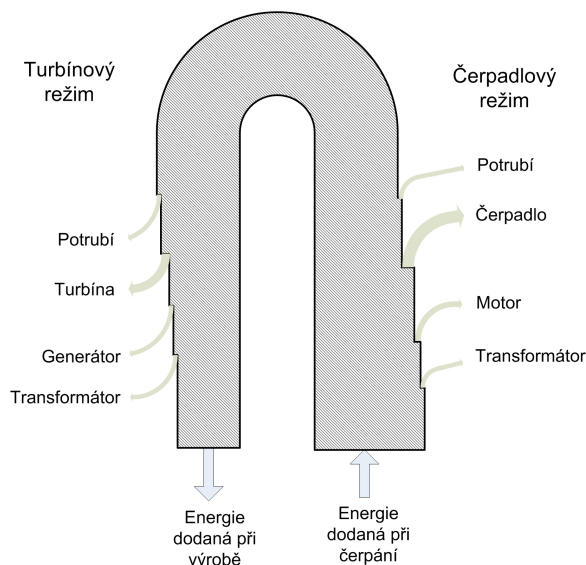
Obr. 4.4: Schéma zapojení akumulčního systému CAES

možné docílit využitím geotermální energie. V ČR nejsou příhodné podmínky k efektivní kooperaci geotermálních vrtů s CAES [22].

AA-CAES vychází z myšlenky adiabatického stlačování vzduchu. Toho nelze regulérně docílit, proto se uvažuje o akumulaci tepla při stlačování vzduchu. Teplo se využívá při zpětném odběru tlakového vzduchu. Zvýšená účinnost této koncepce je podmíněna vyššími investičními náklady a také problémem s objemným tepelným akumulátorem [23, 63, 67]. Nejnovější elektrárnou tohoto typu je Norton Plant v USA. Bude mít celkový instalovaný výkon 2700 MW, který bude tvořen 7 bloky po 300 MW. Technologie je na povrchu vápencového dolu, který pracuje s rozdílem tlaků přibližně (5,5 – 11) MPa. Kaverna je umístěna 670 m pod povrchem. Další plánovanou elektrárnou bude Matagordo Plant s instalovaným výkon 540 MW.

4.1.4 Přečerpávací vodní elektrárny

Přečerpávací vodní elektrárny jsou všeobecně známé. V době špičky čerpají vodu z níže položené nádrže do horní, aby v době nedostatku energie přes turbíny vodu vypustili zpět. Pro jejich další rozvoj jsou nezbytné vhodné geografické podmínky. Jejich výstavba je drahá (příklad srovnání je v příloze D) a pro rychlou reakci (do 10 s) nejsou vhodnými záskokovými zdroji elektrické energie [21, 31, 67].



Obr. 4.5: Diagram účinností přečerpávací vodní elektrárny

4.1.5 Vodíková akumulace

Palivový článek založený na vodíko-kyslíkové konverzi

Na úvod je důležité znovu upozornit, že vodík není primárním palivem (samostatný vodík se v přírodě nevyskytuje), nýbrž je nosičem energie. O tomto systému se velice často hovoří v souvislosti s budoucí dopravou, ale i energetikou. Účinnost zpětné konverze na elektrickou energii je ale velice nízká – do 30 % při použití konvenčních typů palivových a elektrolytických článků. V dnešní době je použití vodíkového hospodářství problematické. Níže následuje krátký výčet akumulačních vlastností a problémů, které s tím souvisí [24, A6].

Soustava může mít tři základní aplikace:

- produkce medicínálních plynů,
- produkce vodíku a kyslíku, jejich akumulaci a následné energetické využití,
- využití v chemickém a potravinářském průmyslu.

Vodík a kyslík jako chemické prvky

- Vodík je bezbarvý plyn bez zápachu, hustota je 0,0899 g/l (lehčí než vzduch), teplota varu je 20,37 K. Výbušný se vzduchem. Kyslík je bezbarvý plyn bez zápachu. Hustota 1,429 g/l (těžší než vzduch), teplota varu je 90,15 K. Ve spojení s organickými materiály může vyvolat hoření nebo výbuch.
- Výroba vodíku

V předešlých úvahách jsme předpokládali výrobu vodíku pomocí elektrolýzy. Elektrolýza je proces, ve kterém se vodík uvolňuje na katodě a na kyslík na anodě. Tato reakce je náročná čistotou vody a elektrickou energií. Pro zvýšení vodivosti vody se používá roztoku nejčastěji KOH.

Jestliže budeme přemýšlet o aplikaci vodíku jako akumulačního média, nesmíme opomenout HTR (vysokoteplotní) reaktory (stále ve vývoji). K rozkladu vody se používá vysoké teploty a pomocí chemicko-technologických prostředků je dosaženo lepší bilance [A5].

- Problémy v akumulaci vodíku

Skladovat vodík ve velkých objemech není dosud stále dostatečně vyřešené. Atomy vodíku jsou velice lehké i malé a unikají skrze krystalové mřížky různých kovů nebo jejich slitin.

Principiálně můžeme vodík skladovat ve třech fázích:

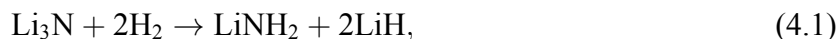
- v plynné fázi,
- v kapalně fázi,
- s pomocí metal-hydridových zásobníků, kdy se plyn naváže na krystalovou strukturu slitiny.

- Výhody systému

Celá soustava obsahuje minimální množství rotujících částí, které mohou být příčinou poruch a problémů. Palivové články jsou velice závislé na čistotě vstupujících médií. Na druhou stranu je ekologicky přívětivý – bezemisní. Neprodukuje také hluk s výjimkou kompresorů apod.

Systém $\text{LiNH}_2 - \text{LiH}$

Další perspektivní metodou je použití adsorpce pomocí lithium nitridu Li_3N . Metoda byla objevena již v roce 1910 a její princip můžeme vyjádřit následující rovnicí:



kde

LiNH_2 je lithium amid.

Vodík je adsorbován a desorbován při teplotě 528 K. Objem adsorbovaného vodíku je 6,5 % z objemu látky. Více lze zjistit například v článku [32]. Tato metoda není pro energetiku příliš vhodná, proto se jí nebudeme již dále zabývat.

4.1.6 Superkapacitory

Superkondenzátory představují nový velkoobjemový systém akumulace energie. Kondenzátory mají hustotu energie řádově 10 Wh.kg^{-1} , delší životnost než konvenční akumulátory a také vyšší účinnost až 95%. Další předností je schopnost dodávky potřebného výkonu v krátkém čase (řádově v milisekundách). V anglické terminologii mají zkratku – SCESS – Super Capacitor Energy Storage System [75]. Energie v kondenzátoru je dána:

$$E = \frac{1}{2}CU^2 \quad (\text{J}), \quad (4.2)$$

kde

U ... napětí (V),

C ... kapacita (F).

Základní myšlenkou superakapacitoru je a byl vývoj optimálních zásobníků s velkou akumulační kapacitou, ale s operativními vlastnostmi kondenzátorů. Kondenzátory, a to jak super nebo

ultra, mohou být aplikovány na zařízení, kde se předpokládá mnohem více nabíjecích a vybíjecích cyklů než by umožňovaly chemické akumulátory (více než 100.000 cyklů).

Superkondenzátor se skládá z kladné a záporné elektrody z hliníkové fólie, dvou vrstev aktivního uhlíku a mezi nimi se nachází separátor. V nenabitém stavu jsou částice s nenulovým nábojem (ionty) rovnoměrně rozloženy ve vodivé tekutině, tekutém nebo gelovém elektrolytu, který se nachází mezi elektrodami. Po přiložení napětí na elektrody se začnou záporné ionty pohybovat ke kladné elektrodě a naopak kladné ionty k záporné elektrodě. Na obou elektrodách se tak vytvoří dvouvrstva se zrcadlovým rozložením elektrického náboje. Použitelné napětí je omezeno hodnotou disociačního napětí. Průrazné napětí elektrické dvouvrstvy je velmi nízké a tak typické provozní napětí superkondenzátorové buňky nepřesahuje 2,3 V. Mezi jejich největší výhody patří:

- nízký vnitřní odpor a tím tedy vysoká účinnost (95 % a více) a velmi malé ztráty,
- vysoká efektivita při nabíjení,
- možnost velmi častého nabíjení a vybíjení (mnoho cyklů).

Nevýhody:

- množství energie uložené na jednotku váhy je nižší než u elektrochemických článků ($3 - 5 \text{ Wh} \cdot \text{kg}^{-1}$ pro superkondenzátory v porovnání s $(30 - 40) \text{ Wh} \cdot \text{kg}^{-1}$ pro klasické baterie),
- napětí se mění v závislosti na množství uložené energie (podobně jako u kondenzátorů,
- mají nejvyšší dielektrickou absorpci ze všech typů.

I přes nevýhody lze říci, že superkondenzátory mají budoucnost. Vyplňují totiž místo mezi klasickými kondenzátory a nabíjecími akumulátory. Mají malou kapacitu, ale naopak akumulátory mají pomalé nabíjení, limitované zatížení a krátkou životnost. A proto se budou superkondenzátory využívat nejpravděpodobněji ke krátkodobému zálohování zdrojů při krátkých výpadcích napájení, vyrovnávání a akumulaci el. energie pro malé větrné a solární elektrárny, hybridní automobily a napájení nízko příkonové kapesní elektroniky. Nejnovější použití superkondenzátorů je ve startovacích bateriích lokomotiv a v moderních hybridních vozidlech.

Novým materiálem, který může změnit využívání kapacitorů je titaničitan barnatý. Tato chemická sloučenina má vynikající dielektrické vlastnosti. Jejich vývojem se zabývá sdružení kolem tzv. EESstoru. Tyto kondenzátory mají poměrně velkou kapacitu při poměrně vysokém napětí. Dosud představená pokusná jednotka má 31 F při napětí 3500 V.

4.1.7 Ni-Cd akumulátory

Nabíjecí cyklus u NiCd článků spočívá ve vytvoření vrstvy oxidu nikelnatého na niklové katodě a zvýšení koncentrace odvodněním elektrolytu, většinou z hydroxidu draselného. Proces vybíjení je charakteristický řidnutím hydroxidového elektrolytu a usazováním niklu na niklové katodě. U těchto akumulátorů je třeba hlídat přebíjení, protože se při chemických reakcích vylučuje velké množství vody do elektrolytu a následně dochází buď k poškození pohlcovače vlhkosti nebo rychlému snižování životnosti [41].

Příkladem použití může být oblastní akumulační stanice ve Fairbanks, Alaska, USA, kde je instalovaný výkon 40 MW v NiCd člancích. Konstrukce průmyslově vyráběných NiCd článků se stejně jako u olovených článků provádí jak do plastových, tak do kovových, hermeticky uzavřených nádob. Katoda je tvořena niklovou elektrodou a anoda kadmiovou, u prvních akumulátorů železnou elektrodou. Dále je akumulátor tvořen vrstvou elektrolytu se separátorem a vratným pohlcovačem vlhkosti. Elektrolyt je ve většině akumulátorů tvořen jednoduchým hydroxidem alkalického prvku, většinou hydroxidem draselným KOH nebo hydroxidem sodným NaOH [41].

4.1.8 Setrvačníky (Flywheel)

Setrvačník je historicky známé zařízení. Jeho přednosti jsou zejména v jednoduchosti a mnohostranném použití. Moderní setrvačníky dosahují běžně rychlosti otáčení přes 20.000 min^{-1} (i přes 50.000 min^{-1}). Samozřejmostí je i použití magnetických ložisek. Rotor se točí ve sníženém tlaku okolního média (blížíci se vakuu). Speciální konstrukční prvky snižují mechanické ztráty na minimum a zaručují vysokou účinnost [58].

Akumulační systémy se setrvačníky by mohly v budoucnu nahradit některé ze starších typů baterií, většinou založených na principu Ni-Cd. Vůči bateriím dosahují tyto systémy poměrně značných výhod, protože množství cyklů není omezeno chemickými pochody. Proto se životnost setrvačníků může pohybovat řádově v desetitisících cyklů, respektive několik let. Záleží pouze na předepsané údržbě (většinou se problém týká ložisek, má-li stroj nějaké a dále může docházet k únikům chladiva, popřípadě ztrátě vakua). Těleso setrvačníku je tvořeno uhlíkovými vlákny, které mají velkou pevnost a při poruše se mohou snadno rozštěpit na malé úlomky s malou kinetickou energií. Účinnost setrvačníku je vysoká, dosahuje hodnoty přes 90 %. Následně, jak uvádí literatura [34], jsou pro výpočet energetického potenciálu setrvačníků nutné následující aspekty. Setrvačníky můžeme dělit na:

- ideální jednorozměrný setrvačník (obrázek 4.6),
- ideální dvojrozměrný nebo vícerozměrný setrvačník (obrázek 4.7).



Obr. 4.6: Schéma jednorozměrného setrvačníku

1. Energie v jednorozměrném setrvačníku je dána rovnicí 4.3:

$$E = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}m(r\omega)^2 = \frac{1}{2}mr^2\omega^2 \quad (\text{J}), \quad (4.3)$$

kde

E ... energie

m ... hmotnost (kg)

r ... poloměr (m)

v ... rychlost ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

ω ... úhlová rychlost ($\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$)

Potom odstředivá síla je dána vztahem 4.4:

$$F = mr\omega^2 \quad (\text{N}), \quad (4.4)$$

kde

F ... síla (N).

Důležitým údajem je také pnutí ve struně u daného typu setrvačníku, která definuje jeho vlastní bezpečnost (4.5):

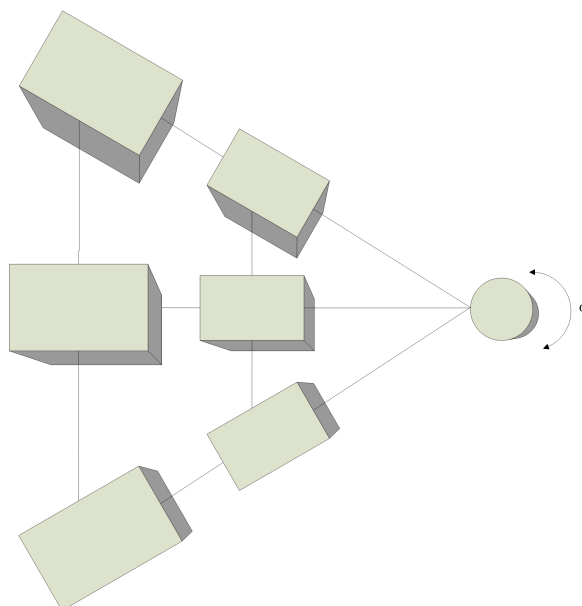
$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (\text{Pa}), \quad (4.5)$$

kde

σ ... tlak

A ... průřez (m^2).

2. Energie v dvojrozměrném setrvačníku je dána:



Obr. 4.7: Schéma dvojrozměrného setrvačníku

Při výpočtu tohoto druhu setrvačníku vycházíme z jeho polárního momentu setrvačnosti (4.6):

$$J = \frac{1}{2}mr_0^2 = \frac{1}{2}\pi\rho r_0^4 \quad (\text{kg} \cdot \text{m}^2), \quad (4.6)$$

kde

J ... moment setrvačnosti

ρ ... hustota ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

Následná vnitřní energie setrvačníku se vypočte:

$$E_{in} = \frac{1}{2}J\omega_{max}^2 \quad (\text{J}), \quad (4.7)$$

Celková energie setrvačníku:

$$E_{out} = \frac{1}{2} J \omega_{max}^2 \left[1 - \left(\frac{1}{k} \right)^2 \right] \quad (J), \quad (4.8)$$

kde

k ... obecný koeficient (1).

Výsledná energie předaná setrvačником do zátěže je dána (4.9):

$$E_{out} = \eta \frac{1}{2} J \omega_{max}^2 \left[1 - \left(\frac{1}{k} \right)^2 \right] \quad (J). \quad (4.9)$$

Výsledná hustota energie setrvačníku je dána vztahem (4.10)

$$\frac{E_{out}}{m} = \frac{1}{4} (r_0 \omega_{max})^2 \left[1 - \left(\frac{1}{k} \right)^2 \right] \quad (1). \quad (4.10)$$

Pnutí v materiálu:

$$\sigma = \rho \frac{3+v}{8} (r_0 \omega_{max})^2 \quad (Pa). \quad (4.11)$$

Na základě výše uvedených vztahů (4.10 a 4.11) můžeme říci, že celková hustota energie, která je uskladněna v setrvačniku, je závislá na vlastnostech materiálu, ze kterého je vyroben.

$$\frac{E}{m} \sim \frac{\sigma}{\rho}. \quad (4.12)$$

Tab. 4.1: Základní rozdělení jednotlivých typů setrvačníků

Kompaktní kovové	Uhlíkové kompozitní	Power ring	Uhlíková vlákna
Pomaluběžné		Rychloběžné	
Klasická ložiska	Magnetická ložiska		Supravodivová ložiska

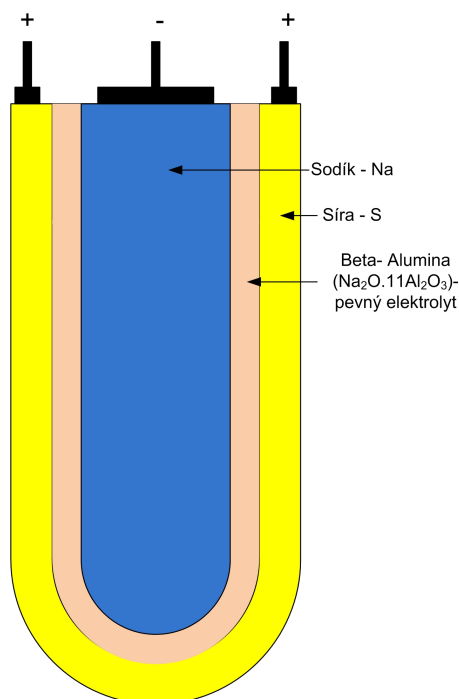
4.1.9 Baterie Sodium – Sulfur (NaS)

Novým trendem je nasazování Sodium – Sulfur (NaS) baterií. Jedná se o kombinaci sodíku a síry. Sodík je velice reaktivní a s alkalickými kovy jako je lithium a draslík tvoří skupinu, která může dosahovat teoreticky velké hustoty energie na jednotku hmotnosti. Tento typ baterie má řádově stovky $\text{Wh} \cdot \text{kg}^{-1}$ ($400 \text{ Wh} \cdot \text{kg}^{-1}$). Například v porovnání s olověnou baterií, která má hustotu energie přibližně $30 \text{ Wh} \cdot \text{kg}^{-1}$, je tento poměr více než jedenáctinásobný. Účinnost akumulace je také vysoká a pohybuje se v rozmezí (86 – 95) % v závislosti na velikosti jednotky [52].

Princip vyjadřuje následující rovnice:



Napětí článku je přibližně $E_{\text{cell}} \approx 2 \text{ V}$.



Obr. 4.8: Principiální schéma NaS baterie [52]

4.1.10 Akumulátor Na-ion

Tento typ baterií představuje jakousi alternativu k lithiovým bateriím. Předpokládá se, že bude levnější a bezpečnější než zmiňované lithiové články. Baterie založené na konverzi sodíkových iontů dosahují vyšší kapacity než baterie lithné. V současné době je problém s katodami těchto baterií a jsou stále ve vývoji. Jmenovité napětí článku je 3,6 V. Kapacita článku je přibližně $400 \text{ Wh} \cdot \text{kg}^{-1}$.

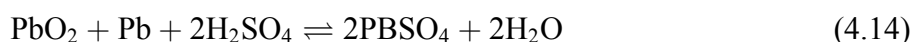
4.1.11 Superconducting magnetic energy storage (SMES)

Superconducting magnetic energy storage je systém, který ukládá energii do magnetického pole. Jedná se o relativně nový systém, který je stále ve výzkumu a vývoji. Malé demonstrační jednotky existují, ale problematická se jeví akumulace vyššího množství energie (nad 1 MWh) [26, 68].

4.1.12 Olověný akumulátor

Olověné baterie mají veliké postavení na našem trhu a napříč zeměmi. Tyto baterie zaujímají celosvětově více než 45 % vyráběných baterií. Olověný akumulátor se skládá z nádoby a ze dvou elektrod odlitých z čistého olova. Dále z vodného roztoku kyseliny sírové o hustotě 1,2 až 1,3 (podle druhu baterií). Kladné elektrody mají tvar mříží, které se plní pastou nebo jsou žebrované. Záporné elektrody jsou také mřížkované a pastované. Jedna deska je vyplněna oxidem olovičitým, druhá houbovým olovem. Místo dvou desek se většinou používá více desek, které nejsou vzdáleny daleko od sebe. Jsou řazeny střídavě, desky stejného druhu jsou spojeny. Deska s oxidem olovičitým je hnědá, deska s houbovým olovem je šedá.

Základní reakce je:



Na pozitivní elektrodě probíhá tato reakce [49] :



Na negativní elektrodě:



Vznikající ionty Pb^{2+} se slučují s ionty kyseliny sírové na síran olovnatý PbSO_4 , který je nerozpustný a zaujímá proto místo PbO_2 .

	Negativní el.	Elektrolyt	Pozitivní el.
Originální materiál	Pb	$2\text{H}_2\text{SO}_4$ a $2\text{H}_2\text{O}$	PbO_2
Ionizační proces		$\text{SO}_4^{2-}, \text{SO}_4^{2-}, 4\text{H}^+$	$4\text{OH}^-, \text{Pb}^{4+}$
Proces procházejícího proudu	$2\text{e}^- + \text{Pb}^{2+}$		$\text{Pb}^{2+} - 2\text{e}^-$
Výsledný produkt při vybíjení	PbSO_4	$4\text{H}_2\text{O}$	PbSO_4

a)

	Negativní el.	Elektrolyt	Pozitivní el.
Výsledný produkt při vybíjení	PbSO_4	$4\text{H}_2\text{O}$	PbSO_4
Ionizační proces	$\text{Pb}^{2+}, \text{SO}_4^{2-}$	$2\text{H}^+, 4\text{OH}^-, 2\text{H}^+$	$\text{SO}_4^{2-}, \text{Pb}^{2+}$
Proces procházejícího proudu	2e^-		$\text{Pb}^{4+} - 2\text{e}^-$
Originální materiál	Pb	$2\text{H}_2\text{O}$ H_2SO_4 H_2SO_4	PbO_2

b)

Obr. 4.9: Nabíjecí a vybíjecí cyklus Pb akumulátorů - a) vybíjecí a b) nabíjecí [46]

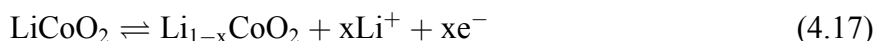
Jak je ukázáno (obr. 4.9), základní elektrodový proces na pozitivní a negativní elektrodě vyžaduje slučovací a vylučovací mechanismus, nikoliv pevnou fázi iontových transportů. Nabíjecí – vybíjecí cykly jsou známy jako dvojité sulfatující reakce.

Při vybíjení klesá koncentrace kyseliny sírové, protože se tvoří voda. Při nabíjení koncentrace opět stoupá. Nabití akumulátoru se dá tedy kontrolovat hustotou kyseliny. Jestliže nabíjení pokračuje i po nabití (veškerý síran je spotřebovaný), dochází na olovené elektrodě k tvorbě vodíku. Na desce s oxidem vzniká kyslík a baterie „vře“. Jestliže přebíjení trvá delší dobu (vyšší proud), nestačí se difusí doplňovat kyselina sírová kolem kladných desek, potom při vybíjení klesá napětí rychleji. Toto všechno jsou ztráty, se kterými musíme počítat.

Nominální napětí článků je 2 V, napětí je změřeno naprázdno, tedy při otevřeném obvodu. Maximální napětí nabitého článku může být až 2,125 V. Vybitý článek má hodnotu 1,75 V na článek, ale při hlubokém vybití může sahat až k hodnotě 1,0 V a to zejména při nízkých teplotách [46]. Hlavní nevýhodou těchto akumulátorů je poměrně nízká hustota energie, dlouhá doba nabíjení, velká hmotnost (což pro stabilní zdroje, nebo pro zdroje vyrovnávací nevadí), která je tvořena především deskami, elektrolytem, konektory atd. Použitím uhlíkových vláken v kladných elektrodách se snížila hmotnost baterií a částečně se zvýšil výkon olovených článků. Olovené baterie byly oblíbenou volbou pro trakční baterie, tak i pro záložní systémy s jednotkovými výkony až 1,5 MW a s počtem cyklů až 2000 (u nejmodernějších baterií). Nejnovější typy jsou většinou bezúdržbové. tzn., že není nutné dolévat vodu. V normálním cyklu je při nabíjení na jedné elektrodě vylučován kyslík a na druhé vodík, se kterým rekombinuje zpět na vodu. Dále mají ochranu proti vznikajícím plynům při přebíjení (tzv. baterie ventilové nebo baterie řízené ventilem, jenž brání případné nadlimitní tvorbě plynů jejich odpouštěním).

4.1.13 Lithiové akumulátory

Lithium je světlý a velmi reaktivní kov. Tím se stává velmi atraktivní pro energetickou akumulaci. Stejně jako předchozí druh baterií založených na sodíku. Anoda konvenčních článků je vyrobena z uhlíku, katoda z oxidu kovů a elektrolytem je lithiová sůl v organických rozpouštědlech. Níže uvedená rovnice vyjadřuje elektrochemickou reakci [A31]:



Další vývoj je zaměřen na technologie LiFePo, Li-air a další technologie, které budou mít lepší ekonomické parametry, i když za cenu menší kapacity. S nasazením lithiových baterií se nicméně uvažuje pouze v bezvýpadkových záložních zařízeních – Uninterruptible Power Supply (UPS).

Velice perspektivní je také technologie akumulátorů založených na $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$. Průkopníkem vývoje je společnost Toshiba, která tuto řadu akumulátorů uvedla na trh v roce 2010 pod názvem SCiB (Super Charge Ion Battery). Výhodou je velmi rychlé nabíjení, které je založeno na materiálu elektrod.

Problematika lithiových článků je velmi široká a tato práce nemůže obsáhnout celou šíři. Další informace k této problematice je možno najít v odborných publikacích autorů Botte, Doyle a Scrosati [6, 11, 62].

4.1.14 ZEBRA akumulátor

Tato baterie má skutečné chemické složení NaNiCl , tedy sodík nikl chlorid. Výhoda této baterie je vyšší energetická hustota než např. u NiCd baterie. Její konstrukce je podobná baterii NaS , taktéž pracuje při vysokých teplotách. Modul baterie je schopný zvládnout až 2500 cyklů. Více informací o tomto typu baterie lze zjistit například v [46].

Základní porovnání předešlých typů baterií shrnuje tabulka 4.2

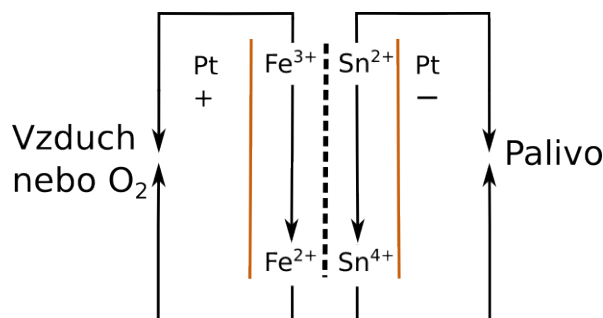
4.1.15 Průtokové akumulátory

Průtokové baterie jsou velmi perspektivními zdroji záložní energie. Jsou založeny na principu redoxního článku.

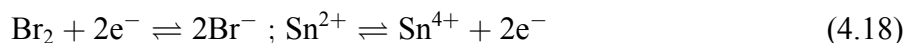
Prvním skutečným redoxním palivovým článkem byl typ, který je schematicky znázorněn na obrázku 4.10. Jedná se o typ, který byl představen v roce 1955 A.M. Posterem.

Tab. 4.2: Porovnání základních typů průtokových baterií

	VRB	Bromid Zinku	PSB - BR/S
Jmenovitý výkon [MW]	< 3	< 1	< 15
Jmenovitá kapacita [MWh]	0,005 - 5	0,01 - 5	0 - 120
Energetická hustota [Wh·l ⁻¹]	16 - 33	60 - 90	20 - 30
Životnost [roky]	5 - 10	5 - 10	15
Počet cyklů	> 12.000	> 2.000	–

**Obr. 4.10:** První redoxní palivový článek z roku 1955 [60] – upraveno autorem

Základní reakci na tomto typu článku můžeme popsat následující rovnicí:



Přehledová tabulka 4.3 určuje jejich základní vlastnosti a výhody oproti jiným typům akumulátorů. Níže najdeme přehled v současnosti možných typů průtokových baterií, ať již na komerční bázi nebo stále ve stádiu vývoje.

Tab. 4.3: Vlastnosti vybraných systémů s porovnáním s redoxovými soustavami [45]

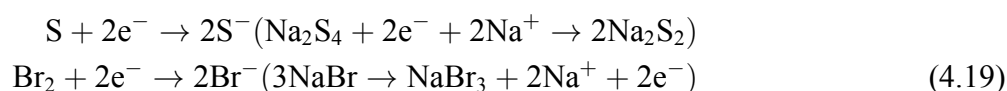
Akumulační systém	Typ procesu	Vlastnosti
Stlačený vzduch	Technologie, která umožňuje uskladnit energii v podobě stlačeného vzduchu.	Speciální geologické podmínky
Přečerpávací el.	energie je uskladněna v podobě potenciální energie vody	Speciální geologické požadavky
Redoxní systémy	Konverze mezi elektrickou a chemickou vazbou látek	Bez speciálních požadavků
SMES	Energie uskladněna v magnetickém poli	Velmi nízké teploty blízké absolutní nule
Setrvačníky	Uskladnění v podobě kinetické energie	Požadavek na vakuum, provozní náklady

V současné době existují tyto druhy průtokových redoxových akumulátorů:

- polysulfidová brómová baterie,
- železo-chromité baterie,
- železo-chlorité baterie,
- zinko-céiové baterie,
- halogenové baterie Br - ZnBr,
- vanadové baterie.

Polysulfidový Brómový akumulátor

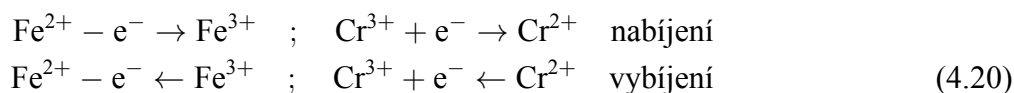
V tomto typu průtokové baterie jsou jako elektrolyt použity roztoky bromidu sodného (NaBr), sodíku (Na) a polysulfidu Sn^{2-} . Kladné ionty sodíku přecházejí membránou během nabíjení nebo vybíjení. Bróm a síra jsou prvky, proto emitují a přijímají elektrony. Tento systém je nazýván spíše jako Br/S. Napětí v otevřeném obvodu je 1,74 V [45, 46]. Její princip popisuje rovnice:



Při vybíjení je reakce opačná. Tato baterie se jeví jako perspektivní pro velké systémy jako jsou akumulární centra v distribučních, či přenosových uzlech. Systém byl vyvíjen společností Regenesys technologies® Ltd. Dostupné informace hovoří o aplikaci s výkonem až 12 MW a kapacitě 120 MWh.

Železo-chromitý akumulátor

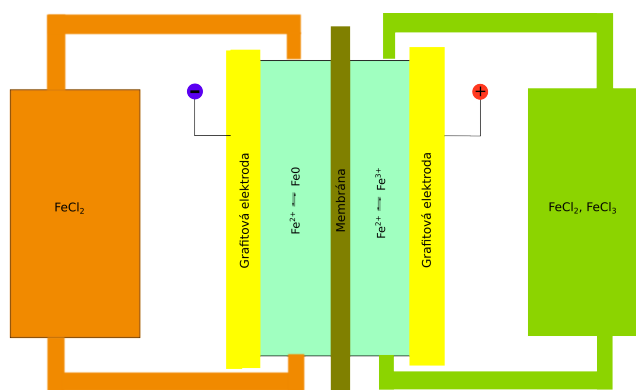
Jedna z prvních aplikací průtokové baterie. Pozitivním reaktantem je železnato-železitý vodný roztok a negativním je chromnato-chromitý roztok. Oba jsou rozpuštěny v kyselině chlorovodíkové (solné). Jejich nabíjení a vybíjení zahrnuje jednoduchou výměnu jednoho elektronu. Na pozitivní elektrodě je železnatý ion transformován na železitý, naopak na negativní elektrodě je chromitý ion měněn na chromnatý [45].



Napětí článku je 1,17 V při nabíjení až po 0,9 V při vybíjení.

Železo-chloritý akumulátor

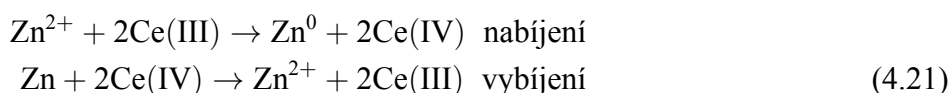
Princip článku ukazuje obrázek 4.11. Jedná se o také o průtokovou baterii. Princip je podobný jako u VRB typu akumulátoru. Pracovním médiem je chlorid železnatý a chlorid železitý. Velkou výhodou jsou velmi nízké náklady na elektrolyt. Pracovní elektrody jsou grafitové, referenční článek je z stříbra (Ag/AgCl). Napětí v otevřeném obvodu je 1,2 V. Nabíjecí napětí je 1,57 V a vybíjecí je 0,87 V [60].



Obr. 4.11: Schematický náčrt jednoho z prvních redoxových pal. článků [60] – upraveno autorem

Zinko-cériový akumulátor

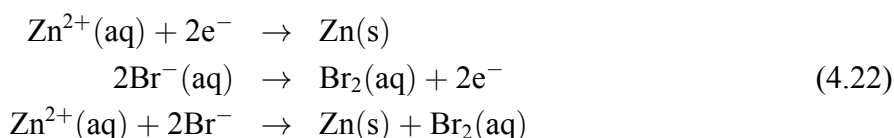
Tento typ baterií byl vyvinut ve firmě Plurion Systems inc. V porovnání s ostatními články má poměrně vysoké napětí - až 2,5 V, které klesá až na 2 V při vybití. Princip vysvětlují rovnice [45]:



Halogenový akumulátor Br - ZnBr

Zinko-bromidová baterie obsahuje zinkovou negativní elektrodu a bromovou pozitivní elektrodu, které jsou od sebe vzájemně odděleny mikropropustnou membránou. Roztok zinku a soubor bromové sloučeniny cirkulují ve dvou oddílech. Tato baterie je založena na poněkud odlišném způsobu než PSB a VRB. V ZnBr slouží elektrody jako substrát pro reakci a jejich kapacita může být zmenšena, jestliže baterie není kompletně a regulérně vybita [45, 46].

Během nabíjení (rovnice 4.22) dochází k pokovení anody zinkem a bróm je vázán na katodu. Při vybití je reakce opačná.

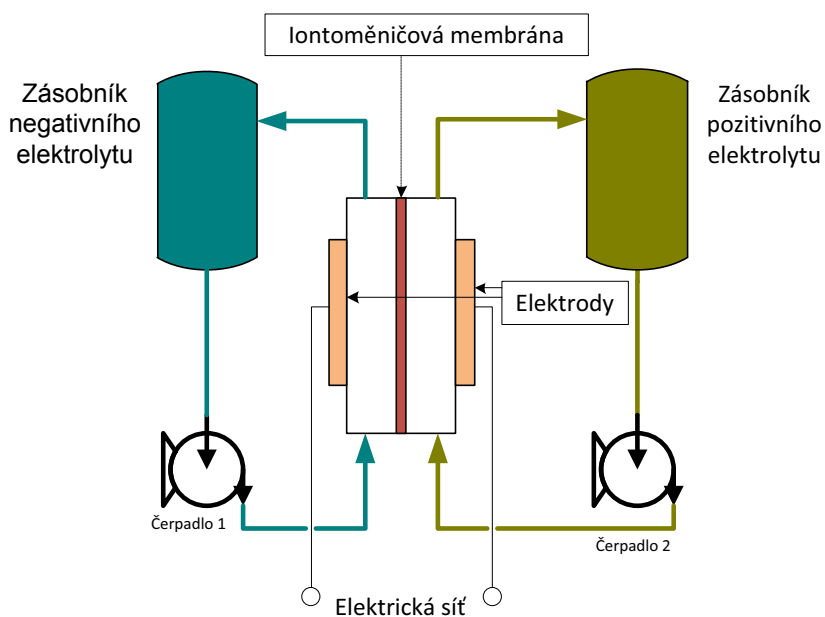


VRB – Vanadový redukčně-oxidační akumulátor

Princip funkce je zřejmý z obrázku 4.12. Je zjevné, že princip článku VRB je blízký funkci palivových článků, u kterých dochází k elektrochemické oxidaci paliva přiváděného do jedné z komor článku, do druhé komory se pak kontinuálně přivádí oxidant. Zásadní výhodou článku VRB je jeho reverzibilita, tj. v tomtéž elektrochemickém měniči může probíhat jak nabíjení, tak vybití podobně jako v klasických typech akumulátorů.

Parametry článků

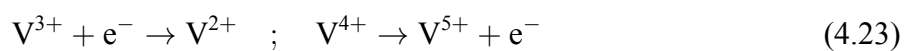
Elektrické parametry článku VRB jsou rovněž blízké akumulátorovým nebo palivovým článkům. Rovnovážné napětí plně nabitého článku VRB při provozní teplotě 25 °C je $V_{oc} = 1,48$ V. Podle stupně nabití se napětí změnou složení obou elektrolytů postupně mění, až u zcela vybitého článku klesne na $V_{od} = 1,30$ V [24]. Skutečné hodnoty lze najít v příloze E. Ty korespondují s danými teoretickými předpoklady.



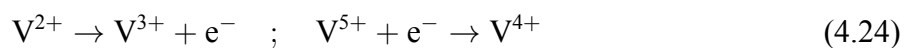
Obr. 4.12: Vanadiová redukně-oxidační baterie

Nabíjecí a vybíjecí rovnice pro VRB:

Pro negativní elektrolyt:



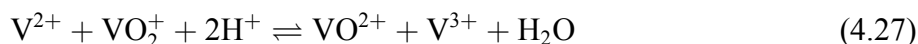
Pro pozitivní elektrolyt:



VRB využívá schopnost vanadu existovat v různých oxidačních stádiích, jak bylo uvedeno v předchozím odstavci. Nicméně ionty vanadu V^{4+} a V^{5+} jsou ve skutečnosti vanadiové oxidy (VO^{2+} a VO_2^+) [4], potom rovnice přecházejí na:



A ve výsledku:



Přechod z režimu nabíjení na vybíjení probíhá prakticky okamžitě (v časech řádu ms) v závislosti na polaritě rozdílu okamžitého rovnovážného napětí a napětí připojeného vnějšího elektrického obvodu. Akumulační kapacita je dána množstvím elektrolytu v zásobnících, přičemž prakticky dosažitelná objemová energetická hustota elektrolytu úplného nabíjecího (vybíjecího) cyklu je uváděna v rozsahu $(15 \text{ až } 25) \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-3}$ (ideálně dosažitelná hodnota činí $(28 \text{ až } 43) \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-3}$). Měrná hmotnost VRB článku dosahuje $6,5 \text{ až } 10 \text{ kg} \cdot \text{kW}^{-1}$ u větších zařízení, u malých výkonů výrobce uvádí max $12,5 \text{ kg} \cdot \text{kW}^{-1}$. Měrná hustota elektrolytu je přibližně 1,4, hmotnost elektrolytu představuje přibližně 90% hmotnosti celého zařízení [24]. V porovnání s klasickými akumulátory má elektrolyt v nabitěm stavu při cirkulaci ve VRB článku jen nepatrné samovybíjení. Pokud je nabitý elektrolyt uskladněn mimo články, zůstává nabitý prakticky po neomezenou dobu.

Prostorová náročnost instalace souvisí především s akumulací kapacitou, přitom oddělené skladování elektrolytu od vlastní VRB, umožňuje snadné přizpůsobení instalace prostorovým podmínkám. Jedná se o stavebnicový celek se základním modulem VRB 5 kW. Pro nejčastější akumulaci kapacitu (doba cca 8 h) se uvádí, že 85 až 90% zastavěné plochy zabírají zásobníky elektrolytu, na vlastní články VRB a řídicí a kontrolní elektroniku připadá zbývajících (15 až 10) %. Zařízení nevykazuje pokles účinnosti ani kapacity po více než 12 tisících nabíjecích cyklech, předpokládaná životnost membrán je cca 15 let, po jejich výměně lze zařízení provozovat i nadále, elektrolyt si přitom udržuje původní parametry a je tak znovu použitelný [24]. Provozní a pořizovací náklady jsou uvedené v €nebo v měrné jednotce €/kWh. U zařízení řádu MWh se pořizovací náklady pohybují mezi 500 – 700 €/kWh, u 100 MWh systému činí okolo 450 €/kWh. Rozšíření akumulací kapacity (elektrolytu) u velkých zařízení přijde na cca 250 €/kWh.

Provozní náklady se omezují jen na pravidelné roční kontroly stavu zařízení, provoz je automatický a programovatelný v systému řízení a kontroly. Při kontinuálním provozu je nutná výměna jediných pohyblivých částí – oběhových čerpadel elektrolytu po cca 5 až 7 letech. Náklady na údržbu a provoz jsou tak odhadovány na cca 0,008 €/kWh. Svými provozními parametry, zejména bezprostředním přechodem z režimu nabíjení na vybíjení, jsou VRB akumulací jednotky optimální k vyrovnávání krátkodobých a střednědobých fluktuací výkonu větrných a fotovoltaických elektráren způsobených obtížně predikovatelným vývojem místních meteorologických podmínek. Tím se významně zvýší kvalita elektrické energie dodávané z tohoto typu zdrojů do elektrizační soustavy.

Vzhledem k minimálním provozním nákladům a zanedbatelnému samovybíjení v klidu lze zařízení využívat jako záložní zdroj s extrémně rychlým njetím na plný výkon pro provoz vyžadující plné zabezpečení napájení elektrickou energií (letišť, nemocnice apod.). Velkými VRB zařízeními je možno realizovat prakticky bez omezení nové akumulací kapacity elektrizační soustavy o výkonu řádu až 100 MW, případně lze využívat i distribuované VRB jednotky v držení drobných investorů prostřednictvím dálkového řízení jako významnou vedlejší systémovou službu pro operativní řízení ES nebo k nouzovému napájení při velkých poruchách v rozvodné síti [24].

4.1.16 Metoda kapalného vzduchu

Metoda kapalného vzduchu je jednou z mechanických forem ukládání energie. Velkou výhodou této metody je možnost využití odpadního tepla produkovaného při ostatních průmyslových činnostech. Výrobce udává vysokou míru spolehlivosti a vysokou míru flexibility systému na zatížení [27]. Metoda je rozdělena do tří kroků:

- zkapalnění,
- uchování média v tekutém stavu,
- zpětná konverze energie na elektrickou energii.

Zkapalnění

Systém pracuje tak, že pomocí elektrické energie je poháněn kompresor, který stlačuje nasávaný plyn. Teplo je odváděno do zásobníku. Následně je přes expandér médium zkapalněno a uskladněno ve velmi dobře izolované nádrži při atmosférickém tlaku [27].

Uchování energie

Uchování energie je prováděno v dobře izolovaných nádržích, odkud je také možné převážet tekutý vzduch pro potřeby dalšího využití. Kapalný vzduch je uložen v nádrži při nízkém tlaku. Tato nádrž současně slouží jako zásobník média. Obecně zde platí, že materiály, které jsou použity, splňují limity i pro zásobníky tekutých LNG, dusíku, kyslíku a jiných technických plynů. Výrobce uvádí, že jedna nádrž o objemu 2000 tun odpovídá přibližně energii 200 MWh [27].

Zpětná konverze

Pokud je potřeba dodávat elektrickou energii do sítě, je kapalný vzduch hnán za pomoci kryogenního čerpadla do výparníku. Odtud přebírá teplo z procesu nebo z okolí. Následný plyn je hnán na expanzní turbínu. Výfukem je odváděn pouze chladný vzduch. Celý systém vlastně připomíná klasický Rankin-Clausiiův cyklus. Částečně můžeme odcházející plyn využít k tak zvané recyklaci (uspoříme exergii), která nám umožní zvýšit účinnost celého systému zkapalnění. Dle [27] lze získat až 50 % nákladů na zkapalňovací proces. Toto má za následek zvýšení účinnosti zpátečního cyklu přibližně o 50 %. Náklady zařízení jsou přibližně 1.100 \$/kW respektive 110 \$/kWh. Životnost zařízení při 80 % DOD je vyšší než 13.000 cyklů. Účinnost zařízení se pohybuje v mezích (50 – 70) % v závislosti na využívání odpadního tepla.

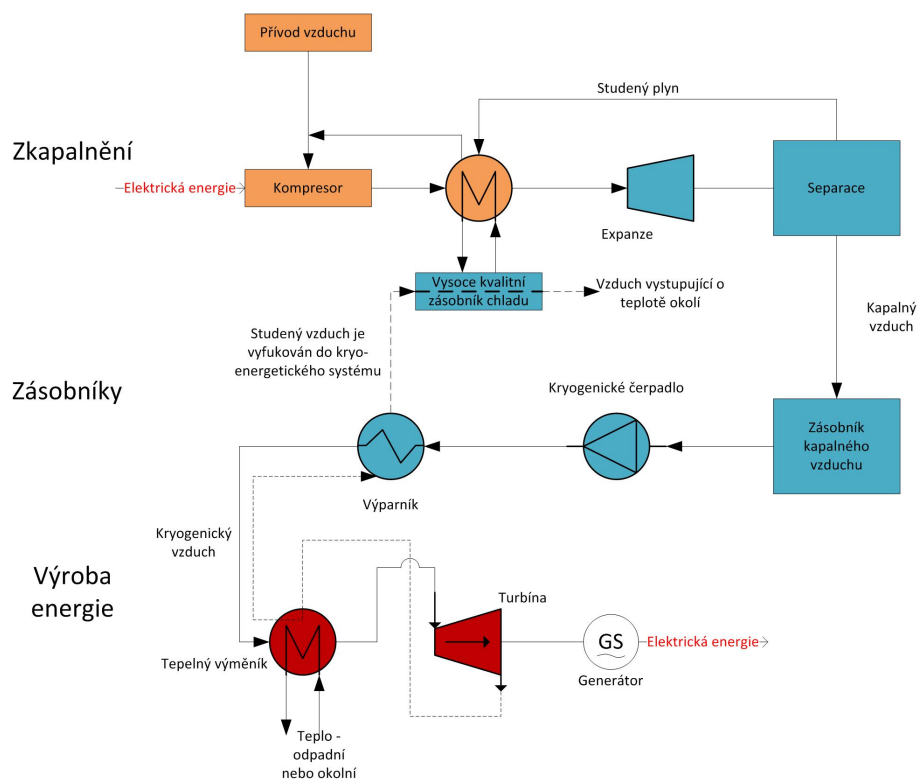
Schéma zařízení je zobrazeno na obrázku 4.13.

4.1.17 Syntetická paliva - syntetický metan

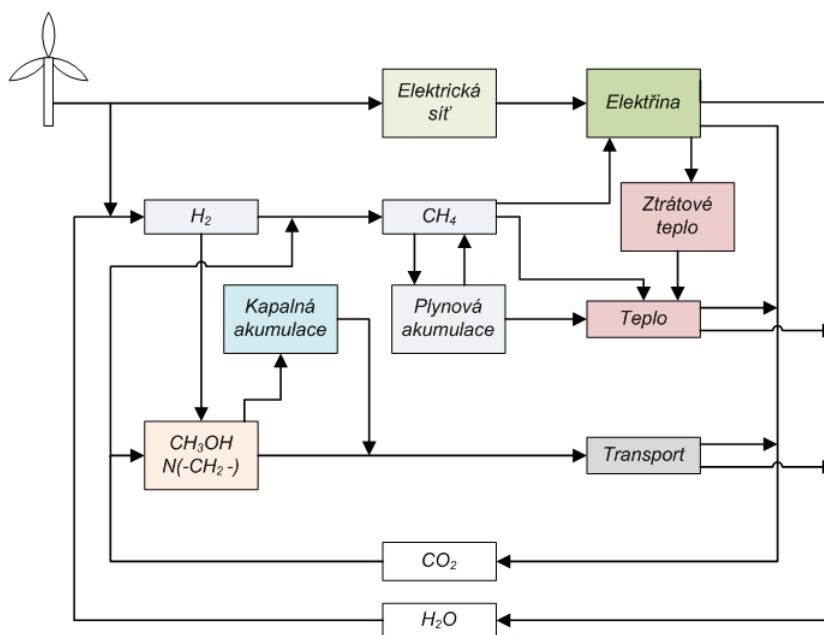
Syntetická paliva lze také považovat za technologii s akumulací kapacity. Dle [54] je akumulací schopnost plynovodů v Německu na úrovni 35 TWh energie. Při využívání syntetických paliv se předpokládá zapojení elektrické energie z obnovitelných zdrojů a tím snížení podílu CO₂ v atmosféře. Na následujícím obrázku 4.14 je vysvětlen základní princip, kterým je vytvoření syntetického metanu.

4.2 Přehledová tabulka současných typů baterií k energetickému využití

V tabulkách 4.5 a 4.6 jsou uvedeny základní vlastnosti nyní vyvinutých a v praxi používaných technologií (na chemické bázi), které jsou schopné doplnit nebo nahradit přečerpávací vodní elektrárny jako jediné médium současné akumulace.



Obr. 4.13: Princip funkce akumulace prostřednictvím kapalného vzduchu

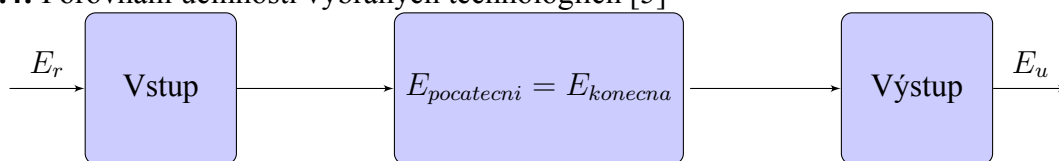


Obr. 4.14: Integrace elektrického, tepelného a transportního systému s „ekologickým“ metanem a kapalnými palivy [54]

Nejvíce preferovanými jsou průtokové akumulační prvky (4.2), následují akumulátory NaS a mechanické, které v tabulce nejsou uvedeny.

Následující tabulka (4.4) vyjadřuje účinnost jednotlivých technologií z pohledu vstupní energie a energií, kterou lze zpětně využít (nemusí se jednat vždy pouze o konverzi elektrická — elektrická, ale i elektrická — tepelná).

Jednoznačně z tabulky 4.4 vyplývá, že akumulace má největší přínos při využívání zejména

Tab. 4.4: Porovnání účinnosti vybraných technologií [5]

Metoda akumulace	Vstup	Výstup	Celková účinnost
Ultrakapacitory	0,95	0,95	0,90
Lithium-ion baterie	0,93	0,93	0,86
Setrvačníky	0,90	0,90	0,81
Olověné baterie	0,85	0,90	0,77
Přečerpávací vodní elektrárny	0,85	0,85	0,72
Stlačený vzduch	0,75	0,85	0,64
Plynný vodík	0,70	0,45	0,32
Kapalný vodík	0,50	0,45	0,25
Horká voda	0,95	0,95	0,90

teplé vody. Tento typ akumulace je vhodný zejména pro menší rodinné domy nebo menší stavby.

4.3 Ostatní typy akumulátorů

Mezi ostatní typy se zařazují akumulátory, které jsou stále ve fázi vývoje nebo jsou produkovány jednotky malých výkonů a malých kapacit. Je na místě zmínit i tyto typy akumulátorů, jelikož za určitých podmínek se mohou v některých případech stát pro energetiku v budoucnu velmi důležité.

Tab. 4.5: Přehledová tabulka současných typů baterií k energetickému využití

Technologie	Aplikace	Výhody / Nevýhody
Olověno-kyselinové	Elektrické/hybridní automobily, malé zásobníky pro domácnosti	Komerčně dostupné, bezúdržbové /nízká specifická energie
Nikl-cadmiové	Elektrické/hybridní automobily, vesmírné aplikace, domácnosti	Komerčně dostupné /relativně vyšší cena, nízká energie
Nikl-metalhydrid	Elektrické/hybridní automobily, vesmírné aplikace, domácnosti	Vysoká specifická energie /relativně drahé
Nikl-železo	Průmyslové	Komerčně dostupné /velká údržba, možnost tvorby vodíku
Nikl-vodík	Armáda, vesmírné tech.	Dlouhá životnost /velice drahé, vysoké samovybíjení
Zinek/oxid stříbra	Armáda, vesmírné tech.	Vysoká specifická energie a výkon /Vysoká cena, velice krátká životnost
Zinek/bromid	–	Nízká cena /nízká energetická hustota
Zinek/vzduch	Průmyslové	Specifická energie /krátká životnost, nízký specifický výkon
Regenesys (PSB, Zn/Br)	Energetický zásobník	Velice velká velikost
Vanad Redox	Energetický zásobník	Velice velká velikost
Sodíko-sírové (NaS)	Energetický zásobník	Vysoká specifická energie a energetická hustota / vysoká teplota
	–	Vysoká specifická energie a energetická hustota / vysoká teplota
Li-C/LiCoO ₂	Elektrické/hybridní automobily, domácnosti	Vysoká specifická energie / cena
Li-C/LiNi _{1-x} CoxO ₂	Elektrické/hybridní automobily, domácnosti	Vysoká specifická energie
Li-C/LiMn ₂ O ₄ (polymerní elektrolyt)	Elektrické/hybridní automobily, domácnosti	Vysoká specifická energie /vyšší cena
Li/MnO ₂ (tekutý elektrolyt)	Domácnosti	Vysoká specifická energie /nutný další vývoj

Těmito akumulátory jsou:

- zinko-vzduchový akumulátor,
- nikl-zinkový akumulátor,
- metal-air akumulátor,
- NiH₂ akumulátory.

U zinko-vzduchových baterií je v současné době problém obnovení kapacity pomocí proudu. Kapacita je obnovována fyzickou výměnou zinku.

Tab. 4.6: Srovnání elektrických vlastností baterií

Technologie	Napětí naprázdno	Napětí v uzavřeném obvodu (V)	Teoretická specifická kapacity ($\text{Ah}\cdot\text{kg}^{-1}$)	Teoretická specifická energie ($\text{Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$)	Rozsah teplot ($^{\circ}\text{C}$)	Doba zno-vunabití (h)	Samovybitení při 20°C
Olověno-kyselinové	2,1	1,98	120	252	-20 - +50	8-24	3
Nikl-kadmiové	1,35	1,2	181	244	-40 - +60	1-16	10
Nikl-metalhydrid	1,35	1,2	178	240	-30 - +65	1-2	30
Nikl-železo	1,4	1,2	224	314	-10 - +60	5	25
Nikl-vodík	1,5	1,2	178	240	-10 - +30	1-24	60
Nikl-Zinek	1,73	1,6	215	372	-20 - +50	8	15
Zinek/oxid stříbra	1,85	1,55	283	524	-20 - +60	8-18	5
Zinek/bromid	1,83	1,6	238	429	+10 - +50	-	12-15
Zinec/vzduch	1,6	1,1	825	1320	0 - +45	-	-
Hliník/vzduch	2,73	1,4	2980	8135	+10 - +60	-	-
Železo/vzduch	1,3	1	960	1250	-20 - +45	-	15
Zinek/vzduch	1,6	1,1	825	1320	0 - +40	-	-
Regenesys (PSB, Zn/Br)	1,5	1,2	27	41	+10 - +50	8-12	5-10
Vanad Redox	1,4	1,25	21	29	+10 - +50	6-10	5-10
Sodíko-sírové (NaS)	2,08	2	375	755	+300 - +350	5-6	-
Sodík/niklchlorid	2,58	2,47	305	787	+250 - +350	3-6	-
Li-C/LiCoO ₂	3-4	3-4	100	360	-20 - +60	-	-
Li-C/LiNi _{1-x} CoxO ₂	3-4	3-4	-	-	-20 - +45	2,5	< 3,5
Li-C/LiMn ₂ O ₄ (polymerní elektrolýt)	3-4	3-4	105	400	-20 - +60	3	< 2,5

4.4 Akumulace prostřednictvím latentního tepla

Látky se změnou skupenství jsou vhodné pro akumulaci tepelné energie pouze v rozsahu vlastních teplot tání. Pokud bychom potřebovali akumulační schopnost vyšší než je jejich bod tání, vyplatí se akumulace do současných materiálů. Velice dobře se uplatňují různé parafíny a vosky. Jejich teploty tání jsou blízké teplotě varu vody.

Eutektické slitiny jsou slitiny materiálů, které při tuhnutí vytvářejí krystaly. Teplota tání dvou kovů by měla být pokud možno co nejbližší. Důležitou vlastností je tzv. eutektická teplota, což je teplota nižší než teplota tání každé ze složek. Při tuhnutí se latentní teplo odevzdává, takže teplota zůstává po nějaký čas stejná. Až poté začne teplota slitiny klesat.

Za zmínku ještě stojí akumulace v přírodních látkách, jako jsou kámen, cihla, voda.

Tyto látky ale z pohledu energetiky (zvláště elektroenergetiky) nemají příliš velký význam. I přes jejich minoritní význam pro energetiku, jejich vývoj nadále pokračuje. Popis jejich vlastností by byl příliš rozsáhlý a nesouvisí přímo s cílem této práce. Více informací se lze dočíst například v [35].

4.5 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 vytvořeny 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).

Kapitola 5

Model baterie

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

5.1 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 [19].

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 [73].

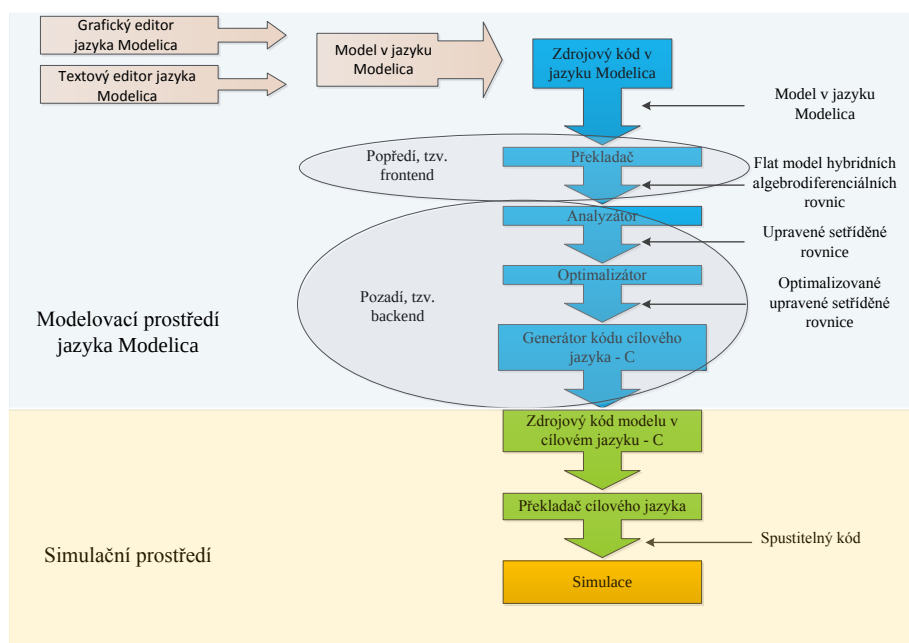
Akauzální modelování je deklarativní styl modelování, jehož význam je v modelování na základě rovnic namísto příkazu přiřazení. Rovnice nejsou zadány, pouze jsou zadány proměnné na vstupu a výstupu. Příkazy přiřazení proměnných na levé straně jsou vždy výstupní (výsledky) a proměnné na pravé straně jsou vždy vstupní. To znamená, že kauzalita rovnice 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 [37]:

- 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.



Obr. 5.1: Princip jazyku Modelica®, vytvořeno podle [19]

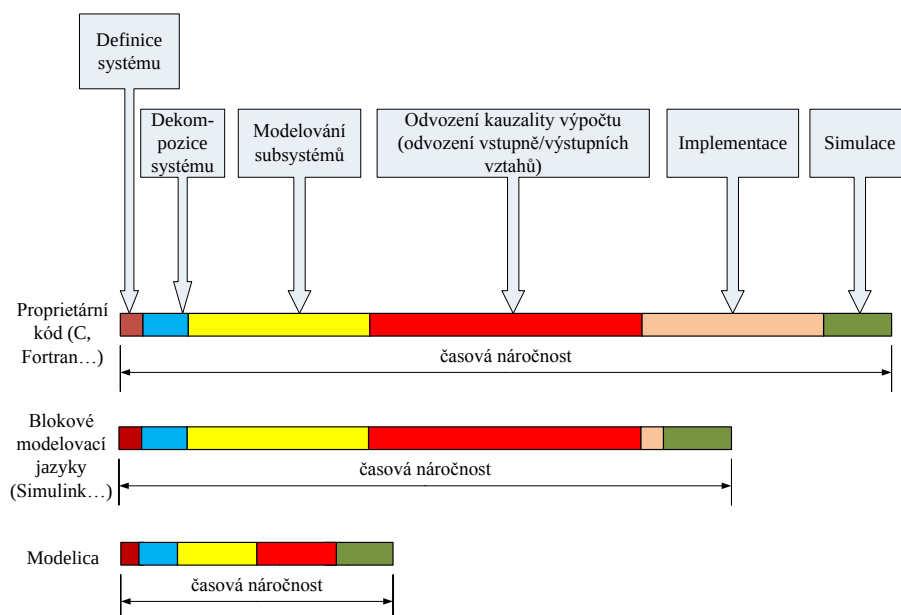
Definici programovacího jazyka Modelica® popsal MUDr. Jiří Kofránek v publikaci [36]: „*Modelica je standardizovaný objektově orientovaný, deklarativní modelovací jazyk pro komponentové modelování komplexních systémů obsahujících komponenty z různých fyzikálních domén. Jazyk využívá akauzální popis modelované reality pomocí rovnic v jednotlivých modelicových třídách.*“ [36]

Základní vlastnosti Modelica® jsou:

- Modelica® je především založena na rovnicích místo na přiřazovacích příkazech.
- Modelica® má multidoménnou 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.

Algoritmus programu je rozdělen do několika kroků, jak ukazuje mimo jiné obrázek 5.1:

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



Obr. 5.2: Princip jazyku Modelica[®] s porovnáním s ostatními typy modelovacích jazyků, vytvořeno podle [19]

Více o systému Modelica[®] lze získat například na oficiálních stránkách (www.modelica.org) nebo v literatuře prof. Frtizsona [19].

5.2 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.

5.3 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 (F)

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

5.3.1 Elektrochemický popis

Pro správné pochopení dějů, které se odehrávají v akumulátoru je nezbytné znát elektrochemické pochody. první přiblížení vyjádřily rovnice 4.25 až 4.27.

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 vanadiové koncentraci a na protonové koncentraci.

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

⁴Více informací lze nalézt v několika článcích, ze kterých cituje i [4], konkrétně v [64, 69, 72]

⁵Kompletní základy a podstatné veličiny a jejich odvození lze nalézt také v [7]

kde

$c_i \dots$ je koncentrace typu i

$E^\circ \dots$ 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

$z \dots$ 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

$a \dots$ 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 $1 \text{ mol} \cdot \text{dm}^3$ [7]

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

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

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.

Tab. 5.1: Provozní parametry VRB článku [4]

Název proměnné	Provozní parametry	Jednotka
I	Elektrický proud	A
$c_{V^{2+}}$	V^{2+} Analytická koncentrace	$\text{mol} \cdot \text{l}^{-1}$
$c_{V^{3+}}$	V^{3+} Analytická 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 [4].

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, jež 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 [4].

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

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) [4], 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).

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

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

Pokud budeme uvažovat termodynamická data z tabulky 5.2 a dosadíme je do rovnice 5.9, bude výsledná entalpie [4]:

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

A podobně s rovnicí 5.10 získáme entropii [4]:

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

Tab. 5.2: Termodynamická data pro vybrané vanadiové sloučeniny při 295,15 K. Hodnoty označeny hvězdičkou jsou odhadovány. [1, 4]

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.

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

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

Pokud si představíme reakci, která byla popsána vztahy (4.25) a (4.27) v kapitole **Průtokové akumulátory** na straně 47, 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 provozu 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 [4].

Tab. 5.3: Rozdíl vanadiových iontů a jejich odpovídajících solí, koncentrace roztoku při nabíjení a vybíjení a typ elektrolytu, ve kterém jsou rozpuštěny [4]

	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

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.

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

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} reflektuje stav koncentrace v nádrži z předchozího provozu. Ve skutečnosti c_{nadrz} je úměrná množství vanadu, který byl transformován v článkách – 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 [4] 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:

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

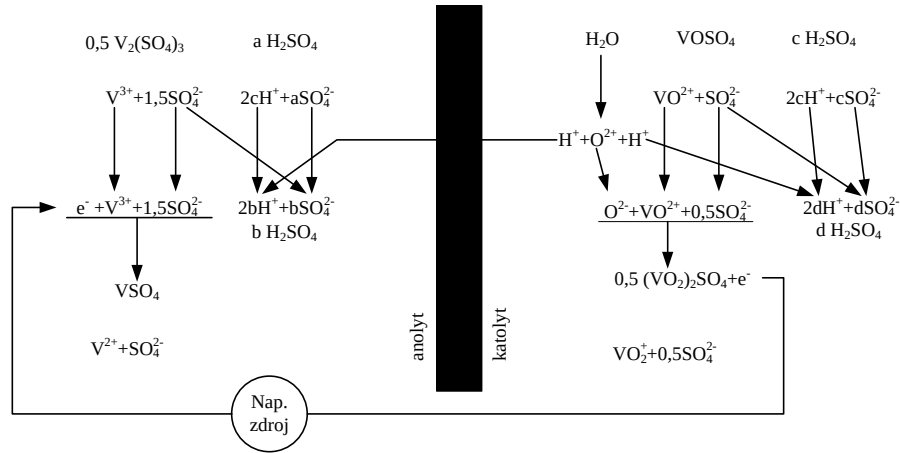
Protonová výměna

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 5.3 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.



Obr. 5.3: Schéma chemických dějů při nabíjení [4] – upraveno autorem

Vnitřní ztráty

Vnitřní ztráty částečně reflektuje již rovnice (6.4). Pro bližší zkoumání můžeme napsat:

$$U_{loss}(t) = \eta_{act}(t) - \eta_{conc}(t) - \eta_{ohm}(t) - \eta_{ion}(t) \quad (V), \quad (5.22)$$

kde

η_{act} ... jsou ztráty aktivační (1)

η_{conc} ... jsou ztráty koncentrační (1)

η_{ohm} ... jsou ztráty odporové (1)

η_{ion} ... jsou ztráty elektrolytické a v membráně (1).

Ve zkratce můžeme definovat souhrn těchto ztrát jako:

$$U_{loss}(t) = R_{nab./vyb.} i(t) \quad (5.23)$$

kde

$R_{nab./vyb.}$... jsou ekvivalentní ohmické ztráty při nabíjení a vybíjení, které byly zjištěny experimentálně a jsou závislé na konstrukci elektrod, elektrolytu a celkové konstrukci článku [64].

Stav nabití

Stav nabití reprezentuje, kolik energie je uskladněno v baterii. Může nabývat v limitních bodech dvou stavů – 1 a 0. Je-li baterie plně nabitá, mluvíme o $SoC = 1$ a $DoD = 0$ a naopak. Kde SoC je stav nabití (State of Charge) a DoD je hloubka vybití (Depth of Discharge).

$$SoC = \left(\frac{c_{V^{2+}}}{c_{V^{2+}} + c_{V^{3+}}} \right) = \left(\frac{c_{V_2^+}}{c_{VO_2^+} + c_{VO_2^+}} \right) \quad (1). \quad (5.24)$$

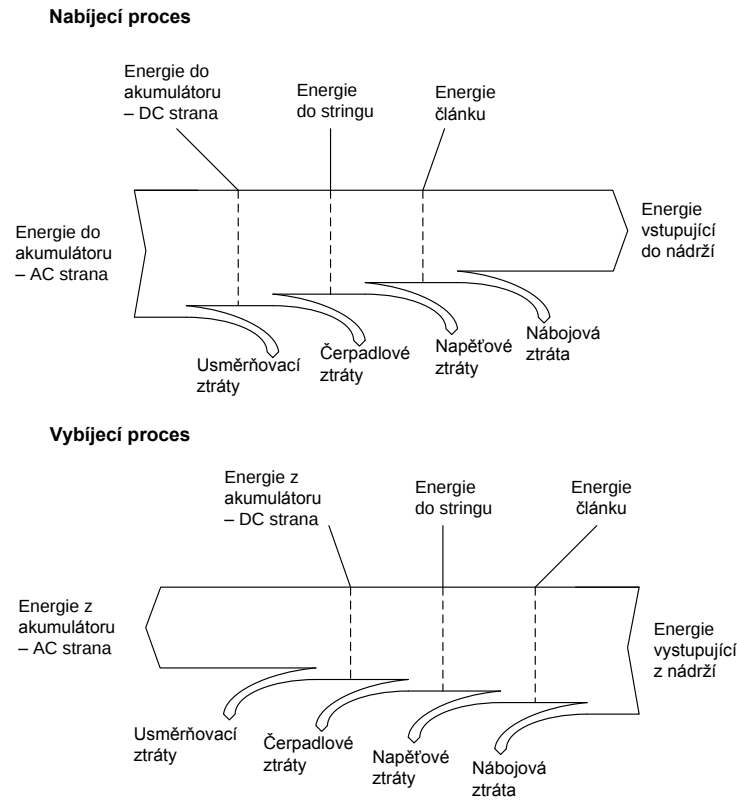
Účinnost

Účinnost celého systému znázorňuje obrázek 5.4.

Důležité parametry pro redoxové akumulátory jsou podle [4, 45]:

- **Nábojová účinnost**

Při rychlém nabíjení a vybíjení vzrůstají ztráty, a proto záleží na provozu baterie, abychom



Obr. 5.4: Grafické ztráty při nabíjení a vybíjení akumulátoru

omezili tyto ztráty Předchozí účinnost proto nelze brát jako ideální. Lepší je zjistit tzv. nábojovou účinnost. Jedná se o poměr mezi nábojem odebraného z baterie při vybíjení a nábojem dodaného do baterie.

$$\eta_{nabojova} = \frac{Q_{vyb.}}{Q_{nab.}} = \frac{\int i_{VRB,vyb.}(t)dt}{\int |i_{VRB,nab.}|(t)dt} \quad (1) \quad (5.25)$$

Zkrácený zápis:

$$\eta_Q = \frac{Q_v}{Q_n} \quad (1), \quad (5.26)$$

kde

$Q_v \dots$ je náboj při vybíjení (C),

$Q_n \dots$ je náboj při nabíjení (C).

- **Napěťová účinnost**

Napěťová účinnost je definována pro nabíjení a vybíjení při konstantním proudu. Vyjadřuje ztráty ohmické a polarizační při cyklech.

$$\eta_{napetova} = \frac{\int U_{clanek,vyb.}(t)dt}{\int U_{clanek,nab.}(t)dt} \quad (1), \quad (5.27)$$

Zkrácený zápis:

$$\eta_U = \frac{U_{cv}}{U_{cn}} \quad (1), \quad (5.28)$$

kde

$U_{cv} \dots$ je napětí článku při vybíjení (V),

$U_{cn} \dots$ je napětí článku při nabíjení (V).

Ale:

$$\eta_{\text{napetova}} \neq \frac{\eta_{\text{energeticka}}}{\eta_{\text{nabojova}}} \quad (5.29)$$

• Výkonová účinnost

Výkonová účinnost je vlastně poměr součinu napětí při nabíjení s proudem tekoucím článkem ku napětí při vybíjení a proudem tekoucím článkem. Nicméně tato hodnota se příliš nepoužívá, lepší je používat hodnoty energetické účinnosti:

$$\eta_P = \frac{P_v}{P_n} = \frac{I(t) \cdot U_{cv}(t)}{I(t) \cdot U_{cn}(t)} \quad (1), \quad (5.30)$$

kde

$P_v \dots$ je výkon článku při vybíjení (W),

$P_n \dots$ je výkon článku při nabíjení (W),

$I \dots$ je proud tekoucí článkem (A).

• Energetická účinnost

Základní veličina udávající účinnost zařízení. Jedná se o poměr mezi dodanou energií baterií při vybíjení a energií potřebnou pro nabití baterie.

$$\eta_{\text{energeticka}} = \frac{\int P_{VRB,vyb.}(t)dt}{\int |P_{VRB,nab.}|(t)dt} \quad (1). \quad (5.31)$$

Zkrácený zápis:

$$\eta_E = \frac{E_v}{E_n} \quad (1), \quad (5.32)$$

kde

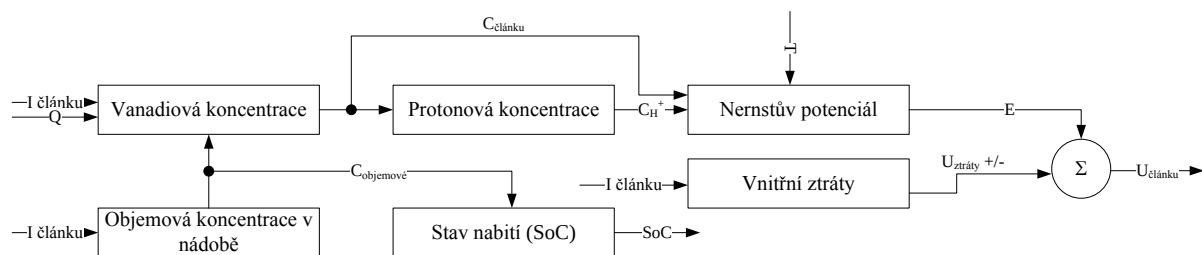
$E_v \dots$ je energie článku při vybíjení (J),

$E_n \dots$ je energie článku při nabíjení (J).

Výsledné chování systému VRB baterie je znázorněno na obrázku 5.5, který srozumitelně popisuje redoxní děj a vše co ovlivňuje výsledné parametry akumulátoru .

Tab. 5.4: Hustota a viskozita vanadiového roztoku – údaje v závorce jsou odhadnuty z kinematické viskozity [4]

Roztok Vanadu	Hustota (g.cm ⁻³)	Viskozita (cP)	Vanad/kyselina sírová-koncentrace (M)
V ²⁺	1,2-1,3	1,7-2,4	1-2 / 2
V ³⁺	1,2-1,5	1,7-9,6	0,5-3 / 2
V ⁴⁺		(3,6-33,7)	0,25-3 / 3
V ⁴⁺	1,2-1,5		1,2 / 1-9
V ⁵⁺	1,2-1,5		1-2 / 1-9
V ⁵⁺		3,2-22,3	0,5-3 / 4-7



Obr. 5.5: Schéma elektrochemického modelu VRB [4]

Pro potvrzení předchozích hodnot roztoku (hustota, viskozita), byly změřeny hodnoty skutečného systému. Údaje jsou uvedeny v přehledové tabulce 5.5.

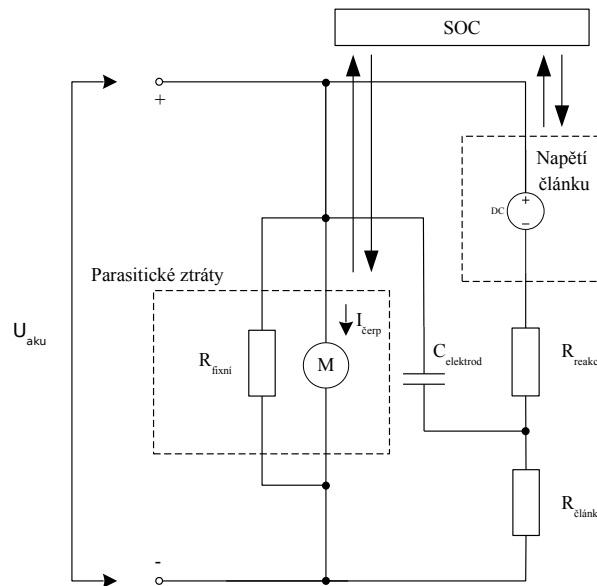
Tab. 5.5: Hustota a viskozita vanadiového roztoku – údaje v závorce jsou odhadnuty z kinematické viskozity ze změřeného článku. Měření probíhalo při teplotě 22 °C pro hustotu a při teplotě 22,4 °C pro viskozitu

Roztok Vanadu	Hustota ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	Viskozita (mm^2s^{-1})
kladný elektrolyt	1,3648	(4,53)
záporný elektrolyt	1,3860	(3,183)

Je vidět, že teoretické (tab. 5.4) i praktické hodnoty (tab. 5.5) jsou téměř identické, respektive, že leží v daných intervalech uvedených v tab. 5.4.

5.3.2 Schéma modelu

Schéma modelu je uvedeno na následujících obrázcích. Model byl zpracován autorem práce ve spolupráci s diplomantem Danielem Korniakem, jehož vedoucím byl autor této práce. Model je vytvořen v prostředí Modelica®. Jedná se o implementaci vybíjecích a nabíjecích závislostí. Nejedná se čistě o model založený na elektrochemickém principu, ale již na jeho skutečných vlastnostech. Během rešerše 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. 5.6: Elektrický model VRB, podle [2] upraveno autorem

$$U_{OCV} = U_{norm} + 2 \frac{RT}{F} \log \left(\frac{SOC}{1 - SOC} \right) \quad (V) \quad (5.33)$$

kde

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

R ... je vnitřní rezistence článku (Ω)

T ... je termodynamická teplota (K)

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

Vztah (5.33) je odvozen ze vztahu (5.2).

Pro zjištění funkčních závislostí byla použita *fitovací* funkce v prostředí Gnuplot a Mathematica. Následně byla sestavena napěťová rovnice pro nabíjení (5.34) a vybíjení (5.35):

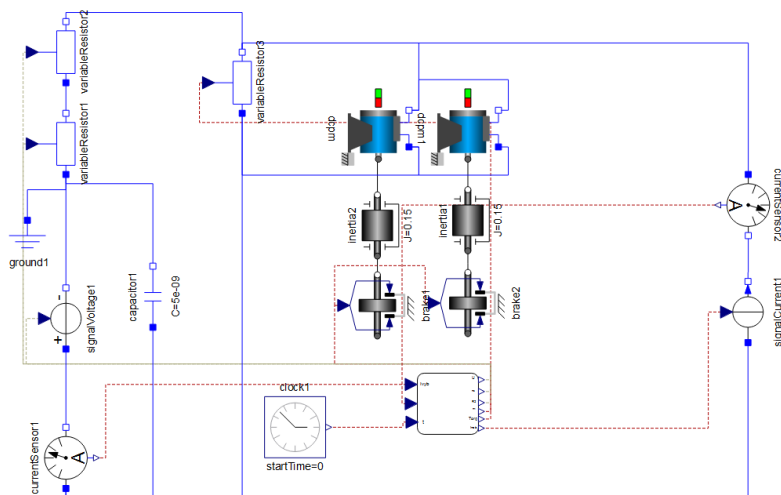
$$\{U_{OCV}\} = -0,0138SOC^2 + 0,535SOC + 56,0493 \quad (5.34)$$

$$\{U_{OCV}\} = -1,1132SOC^2 + 5,8633SOC + 44,791 \quad (5.35)$$

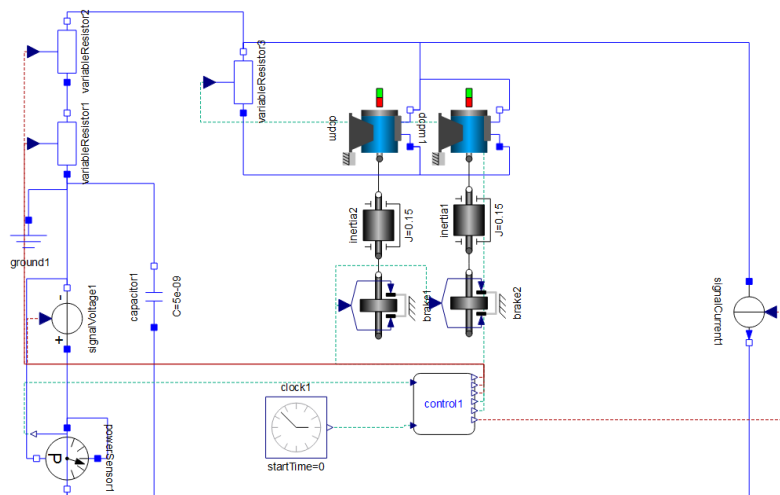
Rovnice byly definovány pro napájení konstantním napětím 56,5 V (kdy se sledovalo zejména chování článku při odběru proudu) a vybíjení při konstantním odběru 40 A (se sledováním poklesu napětí). Z toho jasně vyplývá, že pro lepší aproximaci a zpřesnění hodnot by bylo potřeba změřit více charakteristik 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 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 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 [39].

Schémata jednotlivých modelů, která byla vytvořena se nacházejí na obrázcích 5.7 a 5.8.

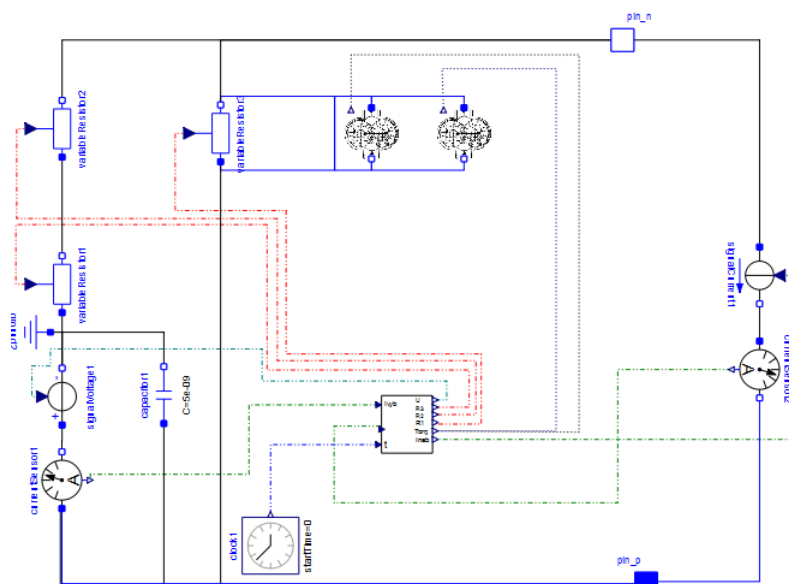


Obr. 5.7: Model baterie vytvořený s pomocí mechanické brzdy pro nabíjení [39]

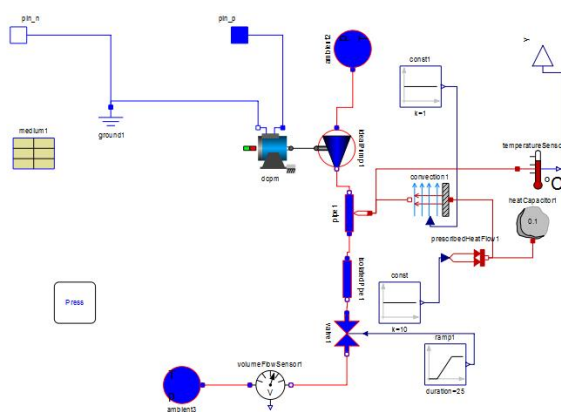


Obr. 5.8: Model baterie vytvořený s pomocí mechanické brzdy pro vybíjení [39]

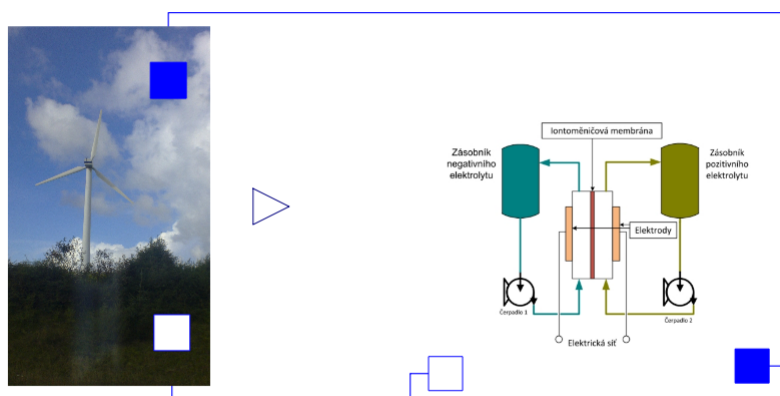
Popsaný model byl následně převeden do skutečné podoby s implementací čerpadel s rozdílnou hustotou a viskozitou elektrolytu pro dvě nádrže. Výsledky simulací odpovídají skutečně změřenému článku i modelu, který byl vytvořen v rámci diplomové práce. Nádrže byly vytvořeny prostředím *Ambient*, kde tlak a teplota odpovídají daným prostředím. Pro každý okruh odpovídají hodnoty kapaliny, tedy hustota i viskozita, které byly změřeny. Dále je zde zakomponován modul, který simuluje ohřívání článku a jeho chlazení. Ze simulací přesto vyplývá, že pro energetické využití je tento parametr zanedbatelný, jinými slovy, nemá vliv na celkovou kapacitu.



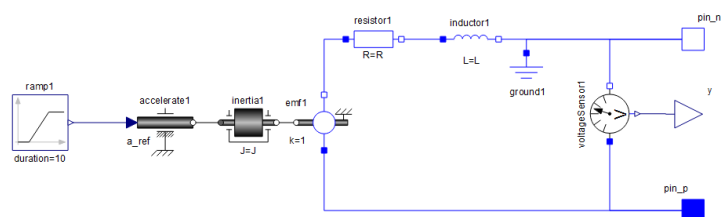
Obr. 5.9: Model baterie vytvořený s pomocí skutečných čerpadel



Obr. 5.10: Detailní model čerpadla



Obr. 5.11: Základní model akumulčního schématu



Obr. 5.12: Základní model větrné elektrárny

5.4 Měřený článek

Evaluační model byl prováděn na skutečném článku (baterii) systému VRB. Jedná se tedy o průtokový typ, který se skládá ze dvou oddělených zásobníků. Princip baterie byl popsán v části 4.1.15 na straně 45. Z výpisů uvedených v příloze E jsou patrné další parametry, které zaznamenává řídicí jednotka. Za pozornost stojí zejména hodnoty *SOC* a *CAPACITY*, kdy tyto dva parametry mezi sebou nekorelují. Příčinou tohoto stavu může být skutečnost, že článek je chráněn proti „podbíjení“ a „přebíjení“ a ochranou proti poškození elektrod.

Základní měření na baterii bylo prováděno následovně:

- vybíjení definovaným proudem,
- nabíjení maximálním napětím.

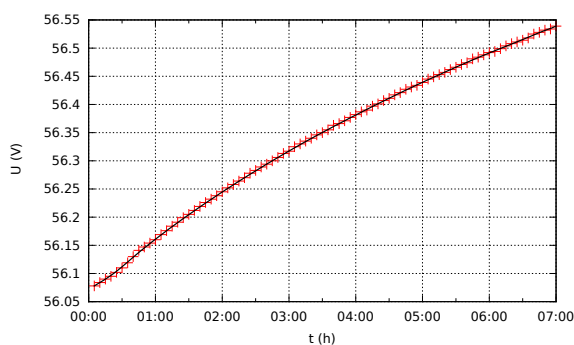
Vybíjecí proud byl nastaven řízenou zátěží na výchozí hodnotu 40 A. Tím bylo docíleno rovnoměrné zatížení, reflektující případné dlouhodobý konstantní odběr výkonu. Za pozornost stojí prů-



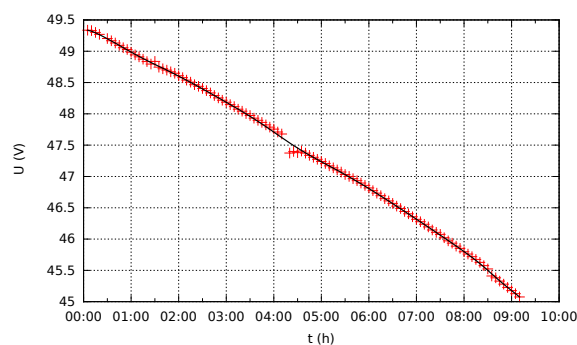
Obr. 5.13: Fotografie kompletního akumulátoru VRB

běh zobrazený na obrázku 5.21. Jsou zde patrné dva skoky, v čase 1,5 h a 8,5 h. Jedná se o příkon čerpadel, která při tomto konstantním odběru zmenšila svůj příkon (měření tedy probíhalo přímo na článku, vybíjecí proud byl nastaven na výstupních svorkách akumulátoru). V závěru opět zvýšila svůj příkon z důvodu již hlubšího vybití akumulátoru.

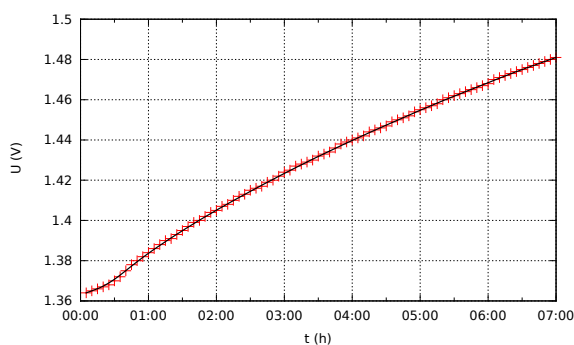
Následující grafy jsou výstupem z tohoto měření. Aproximace byla provedena pomocí Bezie-rovy funkce, která lépe korelovala s měřenými výsledky, než-li aproximace pomocí splajnů.



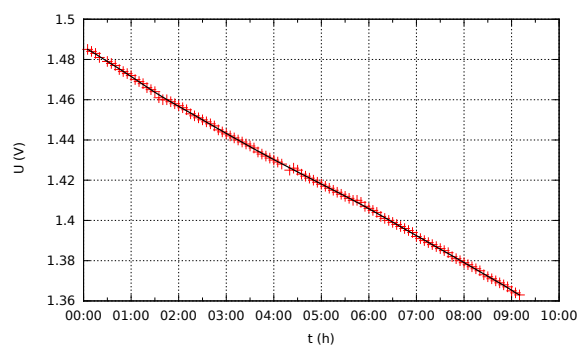
Obr. 5.14: Průběh napětí při nabíjení VRB článku



Obr. 5.15: Pokles napětí při vybíjení VRB článku

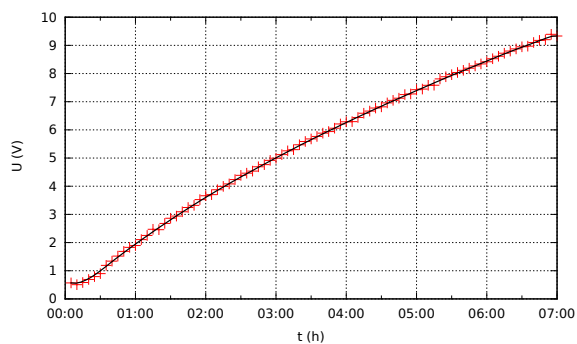


Obr. 5.16: Změřené napětí na pal. článku VRB při nabíjení (napětí měřené přímo na akumulátoru, vzrůst napětí je způsobeno snížením úbytku napětí v přívodním kabelu)

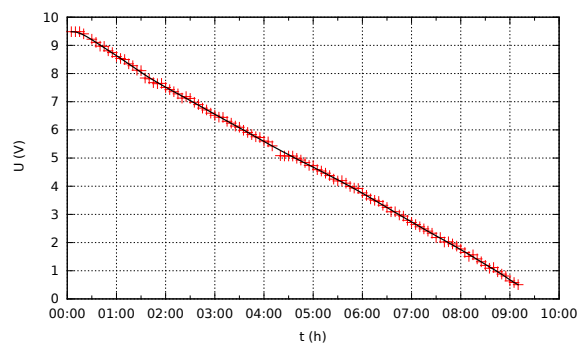


Obr. 5.17: Změřené napětí na pal. článku VRB při vybíjení

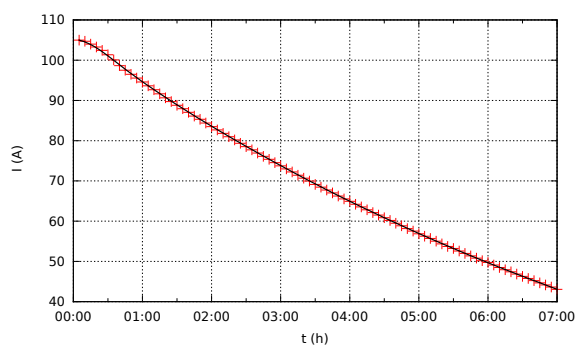
Průběhy byly porovnány s jinými typy akumulátorů – lithiovým a olověným. Jejich průběhy jsou uvedeny v příloze F.



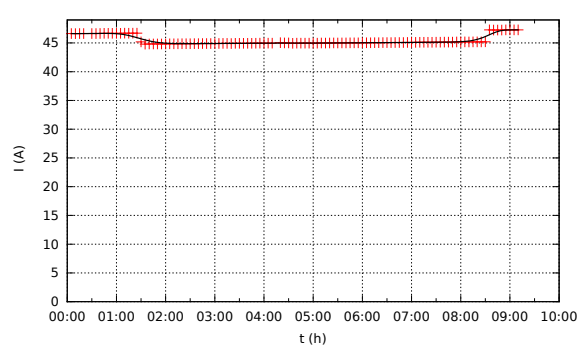
Obr. 5.18: Změřené napětí na řídicím článku VRB při nabíjení



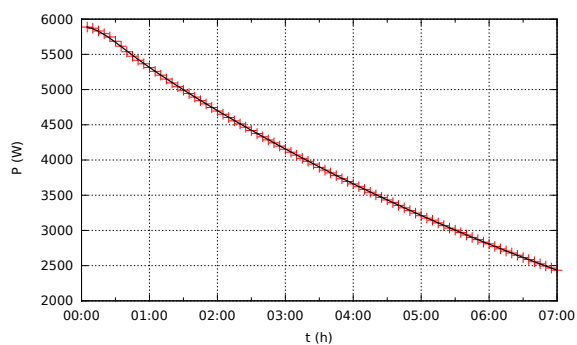
Obr. 5.19: Změřené napětí na řídicím článku VRB při vybíjení



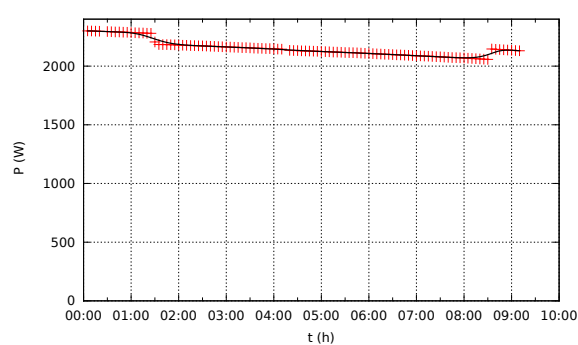
Obr. 5.20: Nabíjecí proud článku VRB



Obr. 5.21: Vybíjecí proud článku VRB

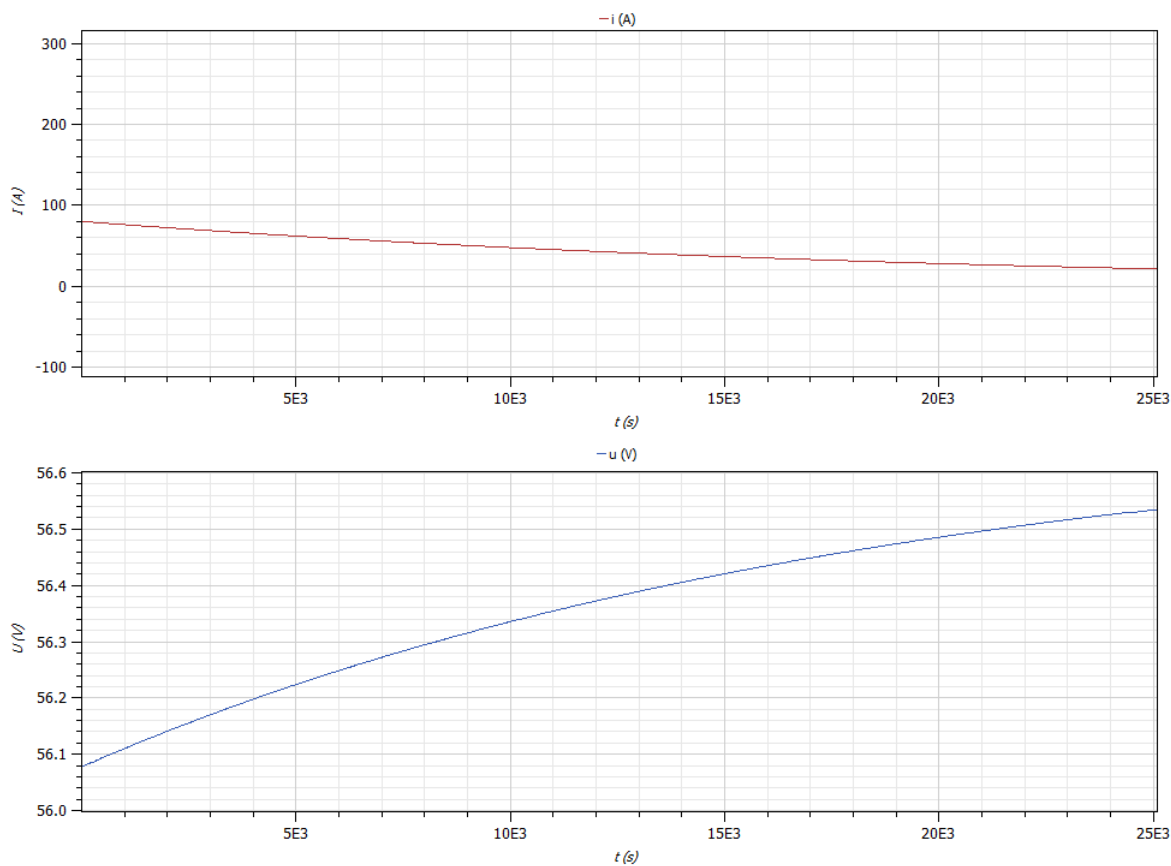


Obr. 5.22: Dodávaný výkon do baterie

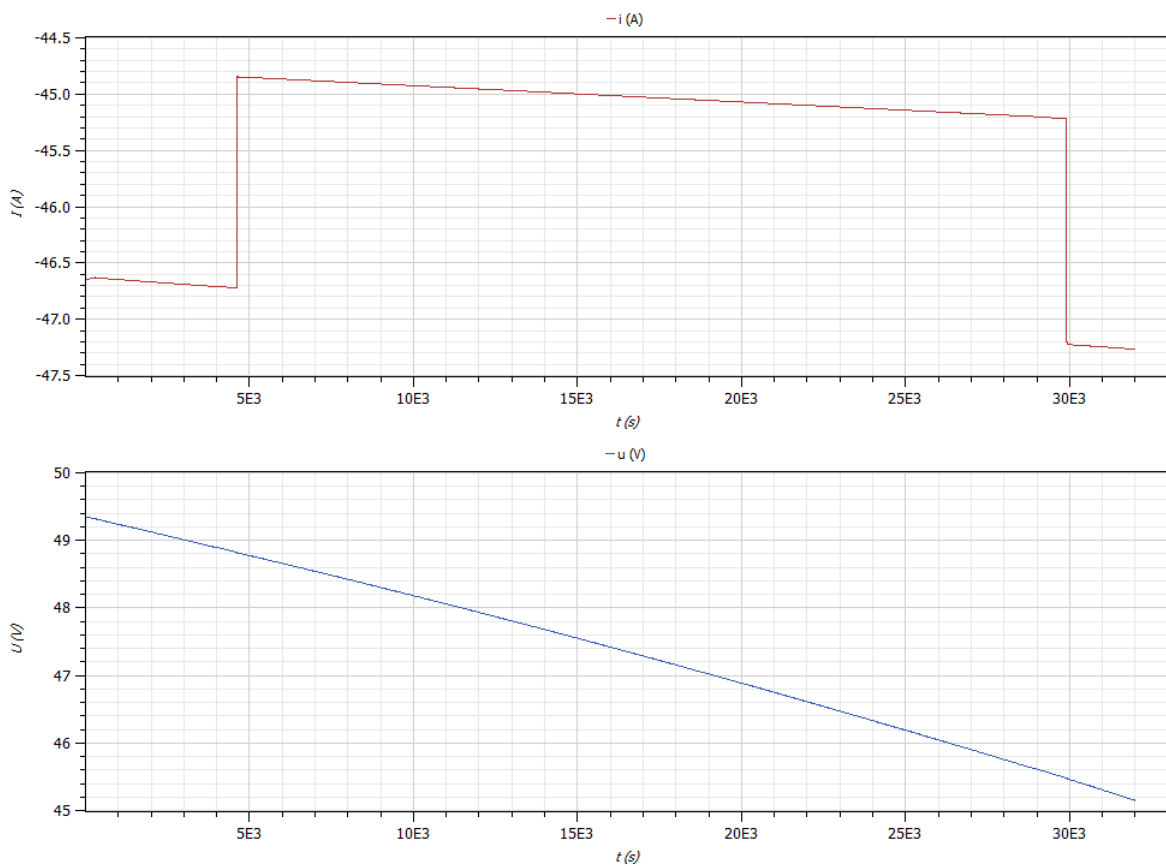


Obr. 5.23: Odebíraný výkon z baterie

Výsledné grafy ze simulace z 5.8 a 5.9:

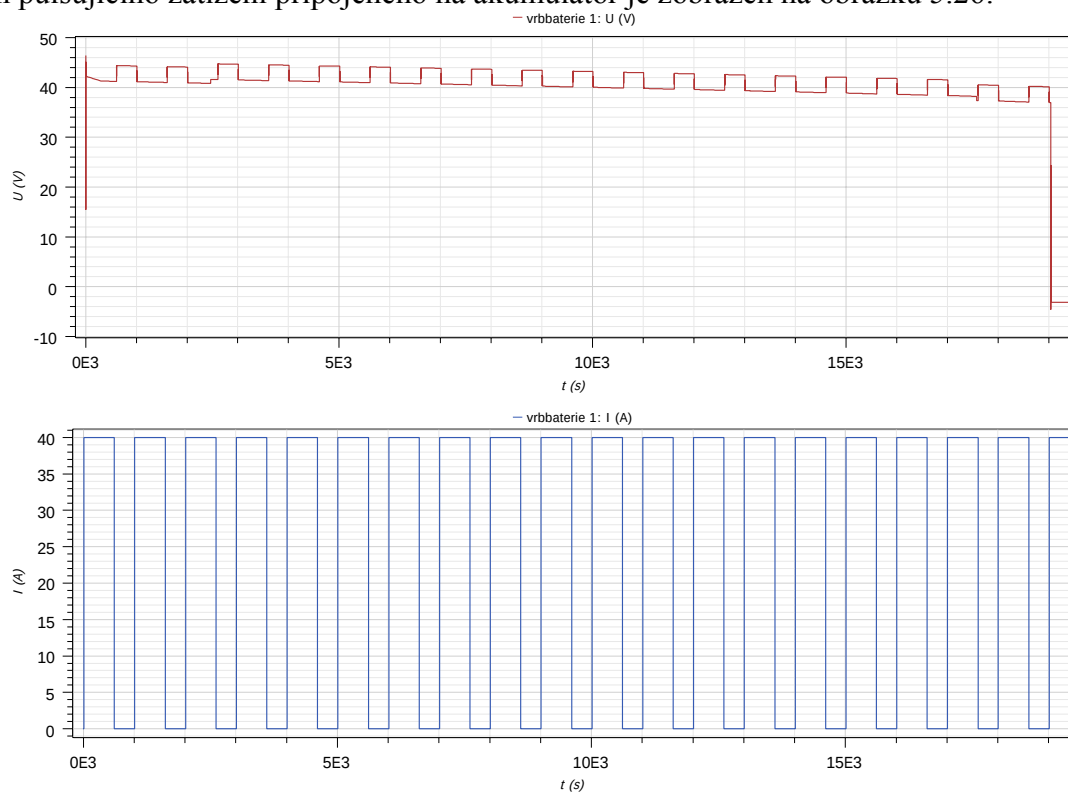


Obr. 5.24: Průběh veličin, který koresponduje s měřeným článkem na obr. 5.14 a 5.20

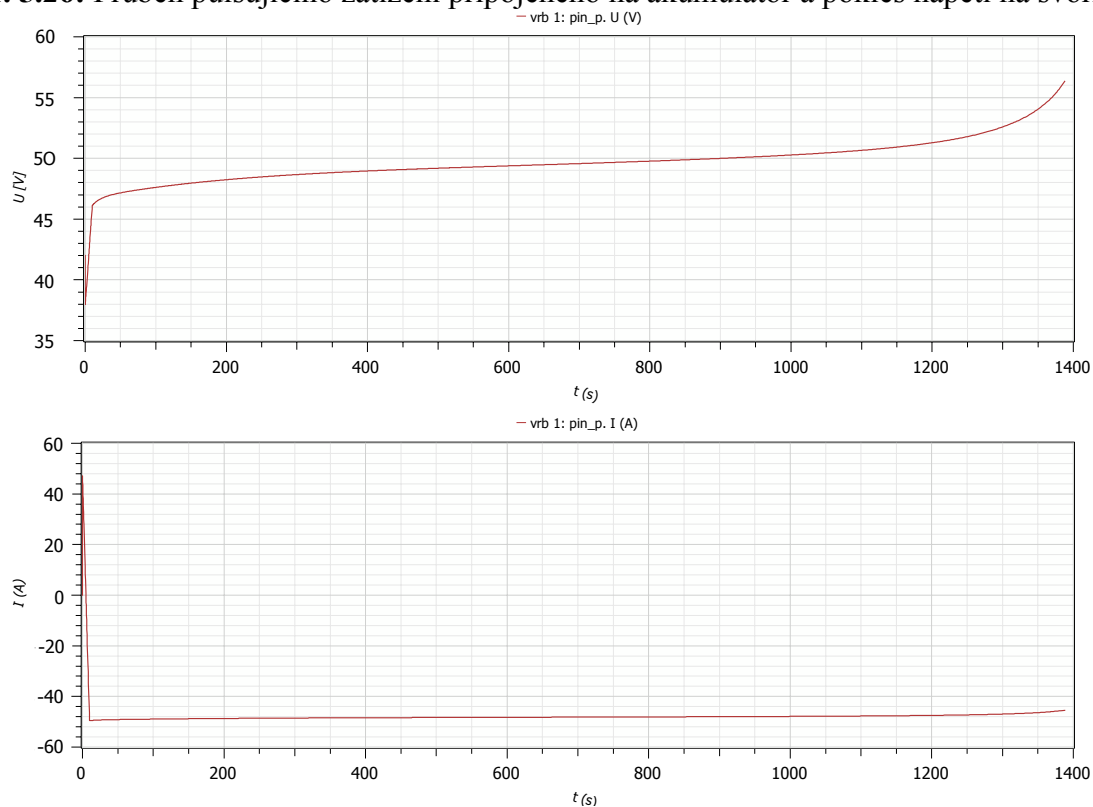


Obr. 5.25: Průběh veličin, který koresponduje s měřeným článkem na obr. 5.15 a 5.21

Průběh pulsujícího zatížení připojeného na akumulátor je zobrazen na obrázku 5.26:

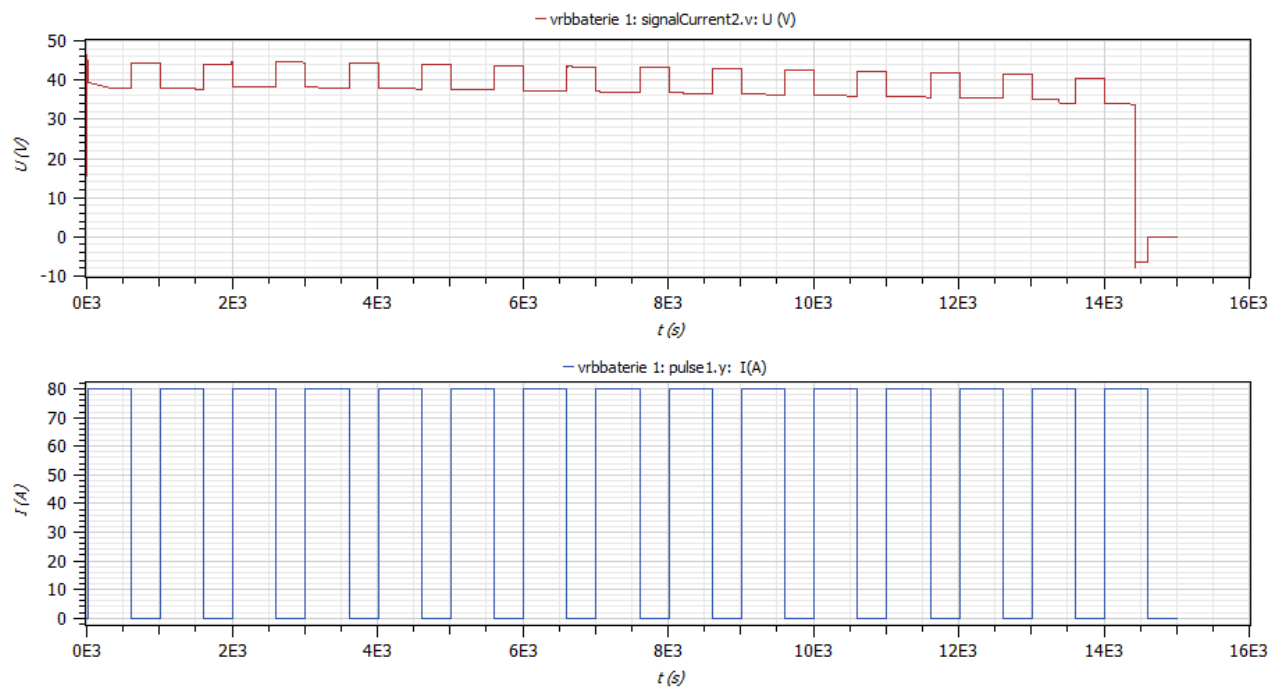


Obr. 5.26: Průběh pulsujícího zatížení připojeného na akumulátor a pokles napětí na svorkách

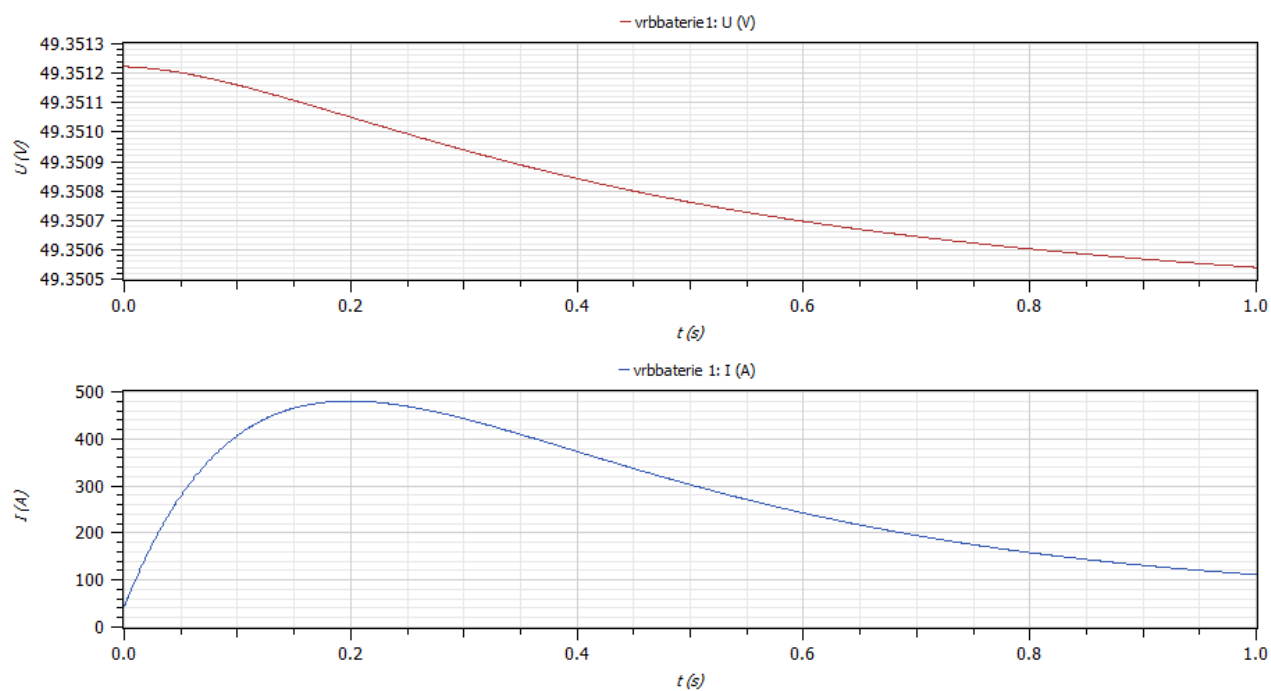


Obr. 5.27: Průběh nabíjecího napětí a proudu z větrné elektrárny do akumulátoru

Pokračování a detail při pulsující zátěži. Průběh nabíjení článku z větrné elektrárny dle zapojení na obrázcích 5.11 a 5.12



Obr. 5.28: Vybíjecí průběh při zatížení s amplitudou 80 A, periodou pulsů 1000 s šířkou pásma 60 a startovacím čase 10 s



Obr. 5.29: Detail napětí a proudu při zapnutí akumulátoru při zátěži.

5.5 Zhodnocení

Modelovaný akumulátor vychází z několika poznatků podobných zařízení ve světě. Na základě znalostí s modelováním akumulčních článků (v příloze F) 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 5.14 – 5.23. 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.

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.

Kapitola 6

Podmínky pro instalaci akumulčních systémů v distribučních soustavách

Pro vlastní přínos akumulčních článků je nutná implementace dle pravidel pro provozování distribučních soustav. Každý článek má své unikátní vlastnosti, které je vhodné využít na maximální možnou míru. Maximální využití v sobě zahrnuje následující aspekty:

- kapacita článku,
- maximální nabíjecí proud,
- maximální vybíjecí proud,
- wattovu účinnost,
- rychlost přechodu mezi nabíjením a vybíjením.

Na základě výše uvedených vlastností můžeme konstatovat, že napětí není rozhodujícím parametrem akumulace.

Pro malé akumulční systémy se jeví jako velmi vhodné použití v distribučních nebo i přenosových soustavách. Následná kapitola se bude věnovat tomuto aspektu, který se může jevit v podmínkách České republiky jako velmi vhodnou alternativou k výstavbě nových vedeních.

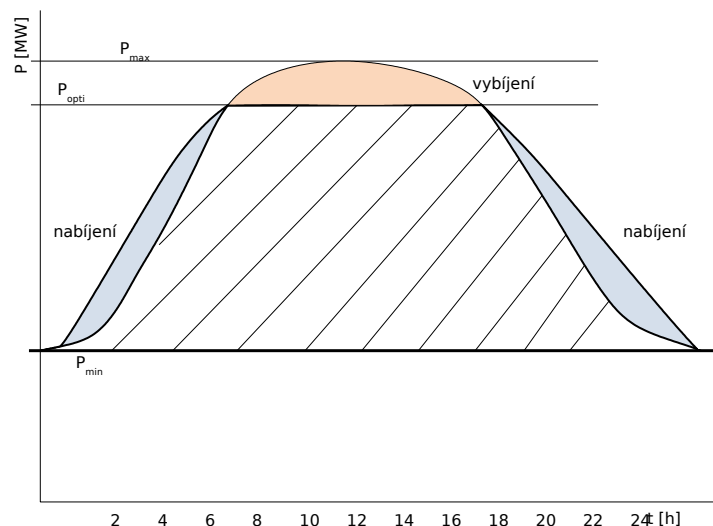
6.1 Nasazení akumulace k potlačení ztrát

V případech, kdy je spotřebou požadována vyšší hodnota zatížení, dochází k přetěžování transformátorů, vedení a ostatních zařízení zapojených v distribuční soustavě. Vhodnou volbou akumulčních jednotek můžeme být schopni eliminovat tyto výkyvy a zajistit kontinuální dodávku elektřiny. Stejně je to i v opačném režimu, kdy řada menších či větších zdrojů OZE jsou zapojeny na koncích distribučních linek a opět dochází k náhodnému přetěžování stávajících linek.

Dokument OTE (Zpráva o očekávané rovnováze mezi nabídkou a poptávkou elektřiny a plynu – 2012) uvádí, citují: „*Omezující faktory výstavby síťové infrastruktury – Aktuálně je doba potřebná k realizaci nových síťových prvků, zejména pokud jde o liniové stavby, neúměrně dlouhá vůči potřebám ES. Požadavky na rozvoj elektrických sítí ze strany odběratelů i ze strany výrobců jsou časově vyžadovány v krátkých časových termínech 2 až 3 roky, realizace nových staveb síťové infrastruktury však mají horizont 5 až 10 let. Vzhledem k obtížné průchodnosti nových koridorů pro liniové stavby je potřeba maximálně využít stávajících tras a koridorů. Při obnově a rekonstrukcích liniových staveb se doporučuje náhrada modernizovanými vedeními s vyšší přenosovou*

schopností a dle možností náhrada dvojitými vedeními. Rozvoj a výstavba síťových prvků jsou beze změn legislativního zázemí na jejich podporu omezeny.“

Z výše uvedeného vyplývá, že pro výstavbu nových linek vedení je zapotřebí dostatečně dlouhá doba. Výstavba nových vedení je opodstatněná a to s ohledem na neustále se zvyšující příkon u jednotlivých koncových odběratelů, nebo-li z důvodu zvyšujícího se odběru elektrické energie.



Obr. 6.1: Zrovnoměrnění diagramu zatížení

Minimální předpoklady [17], ze kterých musíme vycházet při návrhu akumulčních soustav, jsou:

- spolehlivost,
- kvalita elektrické energie,
- rychlost náběhu,
- změna režimu,

Další charakteristiky, které by měl systém obsáhnout jsou:

- celková účinnost,
- cena a provozní náklady,
- náhradní nebo krátkodobý zdroj,
- životnost při nabíjecích/vybíjecích cyklech,
- velikost samovybíjení,
- energetická a výkonová hustota,
- rozměry a objemy systému,
- modularita,
- přepravitelnost,
- jednoduchá montáž (popřípadě systém „Plug and Play“).

6.1.1 Spolehlivost

Spolehlivost je velice důležitá vlastnost pro chování akumulčních zařízení (v anglické literatuře se těmto zařízením říká MES – Modular Electricity Storage) v distribuční a přenosové soustavě.

Při návrhu systému je nutné znát počet cyklů a časovému typu akumulace, budeme vycházet z premisy:

$$zivotnost = \frac{15000 \text{ cyklu}}{365 \text{ dni}} = 42 \text{ roku}, \quad (6.1)$$

kde

15 000 cyklů odpovídá životnosti VRB akumulátoru,

365 dnů odpovídá režimu denní akumulace.

Pokud použijeme technologie s menším počtem cyklů, samozřejmě se zkracuje doba životnosti celku.

6.1.2 Kvalita elektrické energie

Kvalita a charakteristika dodávky elektrické energie ze zařízení podobných MES je velmi důležitá. Zejména se klade důraz na PQ charakter dodávky. Typ měničů (protože se většinou jedná o akumulaci se stejnosměrným vstupem – DC) je nutné volit s ohledem na kvalitu výstupní sinusoidy a také na schopnost regulovat zmíněné PQ režimy. Celkově by tedy měly splňovat následující:

- kvalita sinusoidy,
- napěťovou stabilitu,
- účinník,
- frekvenční stabilitu,
- harmonické.

U harmonické se předpokládá (dle standardu IEEE 519-1992), že maximální celkové harmonické zkreslení (THD) nesmí být větší než 5 %. Frekvenční stabilita nesmí překročit 1 %. Napěťová předpokládá kvalitní řízení na úrovni PQ a tím pádem účinník musí odpovídat těmto předpokladům.

6.1.3 Rychlost reakce

Rychlost náběhu, respektive rychlost reakce na náhlou změnu výkonu. Jedná se zejména o rychlou dodávku potřebného výkonu v distribučních systémech. Spotřeba reaguje velmi pružně, naopak výroba tak pružná není (složitost regulace soustavy). Záleží na typu soustavy, na rychlosti změn v ní. Proto může být kritérium rychlosti marginální.

6.1.4 Změna režimu

Jedno z nejdůležitějších kritérií pro MES a akumulaci všeobecně. Jedná se o rychlost změny nabíjení a vybíjení. Tato základní provozní vlastnost je popsána pro každý typ akumulátoru v kapitole 4.1. V distribučních soustavách je ale toto kritérium umocněno změnou odběru – dodávky výkonu ve velmi rychlém sledu. V autonomních systémech není až tak extrémně důležitá.

Vlastnost zařízení je závislá hlavně na dvou parametrech:

- na kapacitě – SOC,
- na chemicko-fyzikálních vlastnostech.

Základní parametry jednotlivých typů akumulátorů již byly uvedeny v tabulkách 4.5 a 4.6.

6.1.5 Ostatní vlastnosti

Mezi ostatní vlastnosti můžeme zařadit takové, které nejsou nezbytně nutné jako předpoklad pro úspěšné začlenění akumulačního systému do soustavy.

Celková účinnost

Celková účinnost zařízení je důležitá v mnoha ohledech, avšak tento parametr není majoritní u všech typů aplikací. Můžeme jmenovat například jednotky UPS (Uninterruptible power source). U tohoto typu jednotky je účinnost pouze okrajovým parametrem, protože primárním účelem je dodávka výkonu v době výpadku hlavního napájení a ta nastává například pár hodin v roce. Přesto musíme účinnost zohlednit, vyrábíme-li energii z primárních zdrojů s nízkou účinností (většinou z neobnovitelných zdrojů).

Cena a provozní náklady

Cena instalace a provozní náklady představují výraznou rozhodovací funkci pro umístění akumulace. Zejména pro malé jednotky je cena instalace hlavním kritériem. U instalací vyšších výkonů mohou být rozhodující jiné vlastnosti než právě investiční náklady. Jinak je tomu u provozních nákladů. Pro malé jednotky nepředstavují výraznější rozhodovací vliv, pro větší jsou důležitější než cena instalace. Náklady všeobecně mohou být fixní a variabilní [17]:

Fixní – zahrnuje veškeré každoroční opakující se náklady, násobící se s množstvím skladovacích provozů. Příkladem mohou být čtvrtletní nebo roční náklady spojené s kontrolou a diagnostikou zařízení. Nebo náklady spojené s ventilačními a klimatizačními jednotkami.

Variabilní – jsou úměrné množství skladovacích provozů. Variabilní náklady jsou nejvýznamnější zejména s ohledem na provozní součásti a jejich obměnu (elektrolyt, články, elektrody aj.). Závisí na okolnostech – tyto náklady mohou být celkově velmi významné.

Náhradní nebo krátkodobý zdroj

V ojedinělých případech je nutná rychlá reakce akumulátoru mimo standardní provozní výkon. Například Na/S akumulátor je schopen krátkodobě téměř 2 krát zvýšit nominální výstupní výkon vůči normálu. VRB umožňuje pouze asi 1,1 násobek [50].

Životnost při nabíjecích/vybíjecích cyklech

Všechna energetická akumulační média degradují svým provozováním. Tato míra degradace závisí na typu technologie, míře jejího využívání, počtech cyklů, údržbě a míře vybití, aj. Časté vybití a hloubka vybití patří mezi nejčastější příčiny omezení životnosti. Pro většinu systémů se proto ujednala norma, která definuje životnost (počet cyklů) při hloubce vybití 80 % DOD. Některým médiím příliš nevádí mírné přebíjení, jiným více (opět kapitola 4.1). Životnost akumulačního systému je jednou z vlastností, která má vliv na výši variabilních nákladů.

Velikost samovybíjení

Samovybíjení nebo tzv. „Standby režim“ je u dnešních typů velmi nepříjemnou vlastností akumulátorů (olověné, Ni-Cd aj.) Naopak některé netrpí vlastními ztrátami, ale projevuje se u nich „Standby režim“ – například u VRB jsou tyto ztráty poměrně velké z důvodu použití elektrolytických čerpadel. Dalším faktorem ovlivňujícím samovybíjení jsou například teplota, vlhkost aj. Nicméně pro aplikace v distribučních systémech není tato položka rozhodující.

Energetická a výkonová hustota

Energetická hustota pouze říká, jakou dané zařízení bude mít velikost. Pro velké aplikace nemá opodstatnění.

Rozměry a objemy systému

Stejně jako u předešlé položky. Umístění musí respektovat velkou stavební plochu a hmotnost zejména u velkých akumulčních kapacit.

Modularita

Je opodstatněná v případě rozšiřování stávajících systémů. Technologie musí umožňovat rozšiřitelnost s cílem zvýšit kapacitu nebo výstupní výkon (proud). Tato položka je také důležitá při plánování investic, popřípadě obnovy přenosových a distribučních sítí.

Snadná přeprava

Pro mnohé projekty je to klíčová položka. Jsme-li schopni rychle přepravit na místo použití několik akumulátorů, jsme schopni poměrně rychle reagovat na požadavky odběratelů a tím efektivně řídit toky energií v síti.

Jednoduchá montáž (popřípadě systém „Plug and Play“)

Doplňující položka ke dvěma předchozím. Zařízení musí umět komunikovat na běžně používaných protokolech a linkách (např. USB, MODBUS, RS232). V případě jednoduché montáže zařízení, lze využít akumulátor také jako záložní zdroj v současných velkých elektrárnách.

6.2 Využití akumulace odložení rekonstrukce vedení

Tento oddíl se zabývá možným efektivním zapojením akumulční kapacity do sítě, která by mohla mít vliv na celkové energetické (výkonové) toky a tím oddálit potřeby další výstavby elektrických sítí. Pro zlepšení přenosových vlastností se téměř vždy řeší technicko-ekonomický aspekt. Snížení nákladů nebo odložení rekonstrukce (zesílení) vedení má význam pro distribuční i přenosové provozovatele. V České republice zatím nebyla vypracována podobná práce, která by počítala se zapojením větších zásobníků k zefektivnění přenosu současných sítí. Několik studií se věnuje pouze posílení vedení z důvodů budoucí poptávky a zejména s ohledem na OZE. Přitom použitím dostatečných zásobníků by mohla být řada vedení efektivněji zatížena nebo dokonce by mohla být provozována na přirozeném výkonu vedení, kdy dochází k potlačení ztrát.

V zahraničních odborných materiálech je již s touto formou počítáno, protože obměna celých vedení je investice velmi náročná, a zanedbatelná není ani časová náročnost výstavby (např. výstavba nových vedení vvn trvá až 20 roků). O problematice efektivního rozdělení výkonu pojednává kapitola 6.4.

6.2.1 Vliv akumulace na snižování zátěže vedení

Pokud předpokládáme zvyšující se zatížení jednotlivých vedení, je dobré vycházet z historických údajů. Například Zhang uvádí [74], že historicky vychází zatížení vedení podle:

$$S_{max} = S_a e^{\ln(1 + \frac{r_a}{100})t} \quad (6.2)$$

kde

r_a ... je roční přírůstek

S ... je zdánlivý výkon (VA).

Pro lepší představu se nyní pokusíme definovat jednotlivé požadavky na akumulční systémy z pohledu provozovatelů distribučních a přenosových soustav. Akumulční kapacita může jednak vyhlazovat zatížení na vedení, a současně může velmi kladně ovlivňovat parametry ([9]) SAIDI (System Average Interruption Duration Index), SAIFI (System Average Interruption Frequency Index), CAIDI (Customer Average Interruption Duration Index) a ASAI (Average Service Availability Index). SAIDI je definován jako:

$$SAIDI = \frac{\text{Součet veskerych casu preruseni dodavky}}{\text{Celkovy pocet odberatelů}} \quad (\text{h.rok}^{-1}) \quad (6.3)$$

SAIFI:

$$SAIFI = \frac{\text{Suma postizenych poctu odberatelů}}{\text{Celkovy pocet odberatelů}} \quad (1.\text{rok}^{-1}) \quad (6.4)$$

CAIDI:

$$CAIDI = \frac{\text{Součet veskerych casu preruseni dodavky}}{\text{Celkovy pocet postizenych odberatelů}} \quad (\text{h}) \quad (6.5)$$

a ASAI:

$$ASAI = \frac{\text{Součet veskerych casu dodavky el. energie}}{\text{Celkovy pocet nasmlouvane dodavky}} \quad (-) \quad (6.6)$$

Ukazatel ASAI vykazuje podobné parametry SAIFI. V každém případě se jedná o sledování spolehlivosti dodávky odběratelům. Na základě neplnění výše dohodnutých dodávek mohou přijít požadavky na finanční kompenzace ze strany odběratelů. Po začlenění akumulčních prostředků došlo dle empirických zjištění k poklesu všech těchto ukazatelů [56]. Poklesy těchto ukazatelů mají pozitivní vliv na celkovou spolehlivost dodávky elektrické energie.

Následující tabulka 6.1 poskytuje přehled aplikací, které jsou provozně kompatibilní tzn., že nejsou k dispozici žádné provozní konflikty mezi aplikacemi. Kombinace aplikací jsou technicky možné pouze v tom případě, že stejný zásobník můžeme využít pro všechny ostatní aplikace. Dalším pozitivem je, že mají také synergický efekt a vzájemně se doplňují. Předpokladem je celková výhodnost soustavy, tedy, že náklady jsou nižší než výnosy.

Tab. 6.1: Aplikační synergická matice [18]

Aplikace	Elektrická energie s časovým posunem	Kapacita elektrické dodávky	Zatížení	Oblast regulace	Rezervovaná kapacita dodávky	Napěťová podpora ¹	Transienční přetížení ¹	Odložení přenos. a distrib. obnovy ¹	Doba využití energie – nákladový management ¹	Poptávaný výkon ¹	Elektrická spolehlivost ¹	Kvalita energie ¹	OZE – časový posun dodávky	Kapacita OZE – zpevnění	Integrace větrných el.
Elektrická energie s časovým posunem	●	●	●	○	●	●	●	●	○	○	○	○	○	○	○
Kapacita elektrické dodávky	●	●	●	○	●	●	●	●	○	○	○	○	○	○	○
Zatížení	●	●	●	○	●	●	●	●	○	○	○	○	○	○	○
Oblast regulace	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Rezervovaná kapacita dodávky	●	●	●	○	●	●	●	●	○	○	○	○	○	○	○
Napěťová podpora ¹	●	●	●	○	●	●	●	●	○	○	○	○	○	○	○
Transienční přetížení ¹	●	●	●	○	●	●	●	●	○	○	○	○	○	○	○
Odložení přenos. a distrib. obnovy ¹	●	●	●	○	●	●	●	●	○	○	○	○	○	○	○
Doba využití energie – nákladový management ¹	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Poptávaný výkon ¹	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Elektrická spolehlivost ¹	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Kvalita energie ¹	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
OZE – časový posun dodávky	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Kapacita OZE – zpevnění	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Integrace větrných el.	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

● – excelentní ● – dobrý ○ – ucházející ○ – nepříliš vhodný ⊗ – nekompatibilní

Vysvětlivky

¹ Vyžaduje akumulátor, který je umístěn v případě potřeby.

^X Poněkud velmi specifické okolnosti, zejména pokud jde o načasování provozu anebo umístění.

* Většina akumulátorů nemůže poskytovat energii pro obě aplikace současně.

† Vybíjení je velmi shodné pro obě aplikace.

◇ Pro lokalizovanou akumulaci je energie pro nabíjení a) z místních obnovitelných zdrojů energie anebo b) zakoupená mimo lokální zdroje OZE prostřednictvím sítě.

‡ Vyžaduje zužitkování přesně na místě skladování.

Poznámky k tabulce 6.1:

- a) Pro oblast regulace: Předpokladem je, že akumulční kapacita není připojena na distribuční úroveň.
- b) Pro napěťovou podporu: Předpokladem je, a) kapacita je distribuována a b) akumulční systém obsahuje jalovou složku výkonu.
- c) Pro rezervovanou aku. kapacitu: Musíme mít aku. energii minimálně pro jednu hodinu plného vybíjení (abychom mohli nabízet kapacitu alespoň hodinu dopředu - „hour-ahead“).
- d) Pro P&D plánovanou zátěž: Pro zátěž (ranní nebo odpolední špička) zahrnující nabíjení - musí platit převažující cena energie.
- e) Pro P&D Roční hodiny provozu vybíjecího rozsahu je poněkud limitující. Proto je akumulční kapacita dostupná pro ostatní aplikace během roku.
- f) Doba využití: Plánuje se využívání minimálně na úrovni 5-ti hodin denně/7.
- g) Transientní podpora je předpokládána, že je z větší části nebo zcela nekompatibilní s ostatními technologiemi.

6.3 Vanadiový zásobník

Vanadiový zásobník se pro použití v energetických sítích jeví jako nejvhodnější ze současných menších akumulátorů energie (příloha D). Následující text zpřesňuje synergickou matici 6.1 pouze pro vanadiový akumulátor. Na základě výzkumu Sandia National Laboratories⁷ a EPRI-DOE⁸ bylo zjištěno následující [13].

Aplikace (Podle USA norem):

- A Sít'ová úhlová stabilita (Grid Angular Stability)(GAS) – zmírnění výkonových oscilací injekcí nebo absorpcí činného výkonu v periodách 1 až 2 s. Referenční pracovní cyklus pro analýzu je pohotovostní režim pro vzácné události charakterizované 20 oscilačními cykly, kumulativně ekvivalentní plnou energií vybití (FPD) po dobu 1 sekundy, 1 událostí na den, 10 událostmi ročně. Ocenění se provádí vlastními náklady alternativních řešení.
- B Napěťová stabilita (Grid Voltage Stability)(GVS) – napěťový kolaps ve vedení je zmírňován vstřikováním jalového výkonu minimálně po dobu 2 sekund. Referenční pracovní cyklus pro analýzu je pohotovostní režim pro řídké události, který je charakterizován 1 sekundou FPD, 1 událostí na den, 10 událostmi za rok. Ocenění se provádí vlastními náklady alternativních řešení.
- C Regulace sít'ové frekvence (Grid Frequency Excursion Suppresion)(GFS) – Jedná se o točivou rezervu, ekvivalent naší RZTR (tab. 8.1). Vyžaduje uskladnění energie, které dodá reálný výkon v trvání až 30 minut. Referenční pracovní cyklus pro analýzu je pohotovostní režim pro občasné události, charakterizované 15 minutovým FPD, 1 událostí za den, 10 událostmi za rok.
- D Regulační kontrola (Regulation Control)(RC) – Systémová frekvenční regulace pracující ve shodě se zátěží. Referenční pracovní cyklus pro analýzu je charakterizován kontinuálními cykly, které jsou ekvivalentní 7,5 minutám FPD při nabíjecím cyklu (trojúhelníkový průběh), 2 cykly za hodinu použitím v 10. minutě předchozího. Ocenění tržními cenami.
- E Točivá rezerva (Spinning Reserve)(SR) – rezervní výkon pro nejméně 2 hodiny s 10 minutovým oznámením. Referenční pracovní cyklus pro analýzu je pohotovostní režim pro řídké události charakterizované 2 hodinami FPD, 1 událostí na den, 10 událostmi za rok. Ocenění tržními cenami.
- F Krátká kontrola kvality el. energie (Short Duration Power Quality)(SPQ) – schopnost zmírnění napěťové poklesy po krátkodobé případy. Referenční pracovní cyklus pro analýzu je pohotovostní režim pro řídké události charakterizované 5-ti sekundami FPD, 1 událostí na hodinu, 1 událostí na den a 10 událostmi za rok. Ocenění se provádí vlastními náklady alternativních řešení.
- G Dlouhá kontrola kvality el. energie (Short Duration Power Quality)(LPQ) – schopnost zmírnění napěťové poklesy plus má schopnost poskytovat dostatečný výkon po několik hodin. Referenční pracovní cyklus je stejný jako u SPQ, ale s hodnotami 4 hodin FPD, s jednou událostí za rok. Ocenění se provádí vlastními náklady alternativních řešení.

⁷Sandia National Laboratories je významná výzkumná organizace pracující pod záštitou amerického ministerstva energetiky – United States Department of Energy, DOE

⁸EPRI – Electric Power Research Institute

- H Regulace zátěže (Load Shifting)(LS3) – Přesunutí 3 hodin akumulované energie z období nízké hodnoty odběru elektřiny na období s vysokou hodnotu. Referenční pracovní cyklus pro analýzu je naplánován pro 3 hodiny FPD, 1 událostí na den, 60 událostí za rok. Ocenění tržními cenami.
- I Regulace zátěže (Load Shifting)(LS10) – Přesunutí 10 hodin akumulované energie z období nízké hodnoty odběru elektřiny na období s vysokou hodnotu. Referenční pracovní cyklus pro analýzu je naplánován pro 10 hodin FPD, 1 událostí na den, 250 událostmi za rok. Ocenění tržními cenami.

Tab. 6.2: Souhrnná tabulka VRB systému zapojeného do regulace sítě a jeho náklady k roku 2006

Aplikace	Jedna funkce	Kombinace funkcí			
	LS10 – 10 hodin, 250 d/τ	SPQ+LS10+RC+SR	SPQ+LS3+RC+SR	LPQ+LS3+RC+SR	LS10+RC+SR
Alternativní hodnota řešení (\$/kW)	750	1500	1500	2000	750
Počáteční instalační náklady (mil. \$)	26,22	18,28	12,94	24,42	26,22
Celkové náklady (mil. \$)	36,1	24,8	17,6	33,2	35,6
Celkový přínos (mil. \$)	37,1	29,9	22,5	31,3	40,1
NPV (mil. \$)	1,1	5,1	4,9	1,9	4,5
Typ VRB akumulace	VRB–10h	VRB–10h	VRB–3h	VRB–8h	VRB–10h
VRB v roce 2006 (mil. \$)	20,0	20,0	12,0	17,0	20,0
VRB cena pro NPV=0 (mil. \$)	20,8	25,4	17,3	15,7	23,1

6.4 Omezení ztrát a úspora nákladů při výstavbě vedení

Použitím akumulačních prostředků lze docílit poměrně významných úspor při provozu *stávající* elektrizační soustavy. Pokud bychom dostatečně dimenzovali zásobníky energie na straně významných spotřebitelů elektřiny (myšleno i distribuční uzly na hladinách 22 kV), lze velmi efektivně zatížit stávající vedení, zrovnoměnit zatížení a tím pádem snížit náklady na distribuci elektřiny. Další přidanou hodnotou tohoto řešení je, že omezíme nutné investice do posílení vedení. V určitých situacích je použití zásobníku levnější a ekonomicky přijatelnější variantou. Tyto situace je ale těžké konkretizovat. Většinou záleží na dimenzování současného vedení, jeho životnosti a výši nákladů na údržbu.

6.4.1 Ekonomická povaha výroby elektrické energie

Výše zmíněným problémům se věnuje řada publikací (např. [9]). Jestliže budeme uvažovat předchozí tezi, poté můžeme vyjádřit úsporu jako ⁹:

$$N_b = \sum_{i=1}^n P_{ni} - \sum_{i=1}^z P_{zi} - \Delta P = 0 \quad (6.7)$$

⁹Myšleno je ekonomické rozdělení v důsledku minimalizace provozních nákladů, vyjma technických utilit

kde

$P_{ni} \dots$ je činný výkon i -tého elektrárenského zdroje (MW)

$P_{zi} \dots$ je činný příkon i -té zátěže (MW)

$\Delta P \dots$ jsou ztráty v sítích (MW).

Celkové provozní náklady N_b je nutné snižovat. Proto se většina optimalizací zaměřuje na ztráty ΔP ve vedení, které jsou většinou charakterizovány jako $\Delta P = f(P_i)$, nebo-li se jedná o ztráty definované funkcí výroby elektřiny. U většiny zařízení jsou pro vyčíslení celkových ztrát vytvořeny tzv. nákladové charakteristiky. Každé ekonomické uvažování je založeno na minimalizaci netechnických ztrát, tzv. na omezení eventualit, které zdražují provoz jednotky. Je zřejmé, že výkon P_i je omezen podmínkami $P_{i_{min}} \leq P_i \leq P_{i_{max}}$.

Pro celkovou bilanci platí (uvažováním rovnice 6.7):

$$N_s = \sum_i^n N_i(P_i) \quad (6.8)$$

Řešení vztahů je za použití Lagrangeovy funkce. Jak uvádí [9], „metoda Lagrangeových neurčitých činitelů předpokládá nalezení extrémů funkce s vedlejšími podmínkami ve tvaru rovnic - tj. typu vazebních podmínek.“ Pro nalezení extrému se často tato funkce zobecňuje pomocí Kuhn – Tuckerovými podmínkami, které jsou schopné určit extrém funkce při omezujících podmínkách. Lagrangeova pomocná funkce má tvar:

$$L = N_C + \lambda N_b = \sum_{i=1}^n N_i(P_i) + \lambda \sum_{i=1}^n (P_{ni} - P_{zi} - \Delta P) = 0 \quad (6.9)$$

Pakliže budeme dále pokračovat v odvozování, potom dle [9] je volný extrém:

$$\frac{\partial L}{\partial P_1} = \frac{\partial N_1}{\partial P_1} + \lambda \left(1 - \frac{\partial \Delta P}{\partial P_1} \right) = 0 \quad (6.10)$$

$$\frac{\partial L}{\partial P_n} = \frac{\partial N_n}{\partial P_n} + \lambda \left(1 - \frac{\partial \Delta P}{\partial P_n} \right) = 0 \quad (6.11)$$

Řešením rovnic získáme kritérium ekonomického rozdělení zatížení [9]:

$$-\lambda = \frac{\frac{\partial N_1}{\partial P_1}}{1 - \frac{\partial \Delta P}{\partial P_1}} = \frac{\frac{\partial N_2}{\partial P_2}}{1 - \frac{\partial \Delta P}{\partial P_2}} = \dots = \frac{\frac{\partial N_n}{\partial P_n}}{1 - \frac{\partial \Delta P}{\partial P_n}} \quad (6.12)$$

kde

$b_i = \frac{\partial N_i}{\partial P_i} \dots$ je poměrný přírůstek nákladů

$p_i = \frac{\partial \Delta P}{\partial P_i} \dots$ je poměrný přírůstek ztrát ve vedení.

Potom:

$$-\lambda = \frac{b_1}{1 - p_1} = \frac{b_2}{1 - p_2} = \dots = \frac{b_n}{1 - p_n} \quad (6.13)$$

Stejným způsobem se řeší i bilance jalové energie. Daná premisa se hodí i na ekonomické rozdělování výkonů z různých druhů zařízení (tepelné, jaderné, vodní aj.). Lze též vyjádřit celkovou náročnost výroby ve vztahu k životnímu prostředí. V tom případě by se uplatňoval vliv například emisních povolenek a jiné.

Na základě předchozího a dále za pomoci Ter-Gazariana [66], můžeme následně předpokládat, že výroba má zatížení N_p a N_h a relativní přírůstky k_1 a k_2 . K nabíjení akumulátoru vzroste zatížení výroby ΔN_h na novou hodnotu N_h . Výkon potřebný k nabití proto bude úměrný $P_{sc} = \Delta N_h$. Naopak vybíjení můžeme popsat jako nedostatek na straně výroby o ΔN_p . Potom výkon dodávaný akumulátorem bude úměrný $P_{sd} = \Delta N_p$. Akumulovaná energie je závislá od doby nabíjení t_c akumulátoru a hodnotě N_h . Potom můžeme napsat:

$$E_c = N_{sc} t_c \quad (6.14)$$

Pro vybíjení je režim opačný:

$$E_d = N_{sd} t_d \quad (6.15)$$

Následující matematický model je vyjádřením akumulace:

$$E_d = \eta_c \eta_s(t) \eta_d E_c \quad (6.16)$$

$$\Delta N_p = \frac{\Delta N_h \eta_s t_c}{t_d} \quad (6.17)$$

$$N_{sd} = \frac{N_{sc} \eta_s t_c}{t_d} \quad (6.18)$$

kde

$t \dots$ je čas mezi N_h a N_p

$t_d \dots$ je čas při N_p .

Funkce, která by vyjádřila úsporu energie je vlastně rozdílem mezi režimem **bez** a režimem **s** akumulací:

$$\begin{aligned} \Delta K_f(P_c) &= K_{f2}(N_p) t_d - K_{f2}(N_p - P_d) t_d - [K_{f1}(N_h) t_c - K_{f1}(N_h + P_c) t_c] = \\ &= [K_{f2}(N_p) - K_{f2}(N_p - \eta_s P_c t_c / t_d)] t_d - [K_{f1}(N_h) - K_{f1}(N_h + P_c)] t_c \end{aligned} \quad (6.19)$$

Je zřejmé, že výkony P_c a P_s jsou omezeny podmínkami:

$$0 \leq P_c \leq P_s \quad (6.20)$$

$$0 \leq P_d \leq P_s \quad (6.21)$$

Dále hledáme ekonomické optimální použití. To zjistíme tak, že rovnici podrobíme první derivaci a hledáme minimum funkce podle dP_s :

$$\frac{d[\Delta K_f(P_s)]}{dP_s} = \left[\frac{\eta_s dK_{f2}(N_p - \eta_s P_c t_c / t_d)}{d(N_p - \eta_s P_c t_c / t_d)} - \frac{dK_{f1}(N_h + P_c)}{d(N_h + P_c)} \right] t_c \quad (6.22)$$

Platí, že extrémní podmínka je:

$$\frac{d[\Delta K_f(P_s)]}{dP_s} = 0 \quad (6.23)$$

Výpočet vede na dva extrémy: maximální nebo minimální náklady. Rozdíl závisí na popisu druhé derivace [66] $d[\delta K_s(P_s)]/dP_s$. V podstatě jde o to, že pokud vyjde záporná, tak to znamená, že akumulátor je vybitý a náklady na palivo vzrostou. To není pro nás optimální. Naopak, je-li kladná, je použití akumulace výhodné. Proto můžeme tvrdit, hledáme takové řešení, které bude cílit na snížení nákladů na palivo. To by splňovala podmínka:

$$\eta_s \frac{dK_{f2}(N_2, P_s)}{dP_s} - \frac{dK_{f1}(N_1, P_s)}{dP_s} = 0, \quad (6.24)$$

kteřá je tedy naším hledaným optimem.

Vše ovšem závisí na křivce zatížení daného výrobního bloku a také na křivce nákladů daného bloku. Přírůstek nákladů skrze akumulaci, může být definován rovnicí:

$$\Delta K_f = \frac{P_s dK_f}{d(N_1 + P_s)} \quad (6.25)$$

Funkce je také sumací n palivových nákladů:

$$\Delta K_f = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta N_i dK_f}{dN_i} = \sum_{i=1}^n k_{\Delta} N_i \quad (6.26)$$

kde

$k_i \dots$ je relativní zvýšení pro i -té jednotku

$\delta N_i \dots$ přírůstek výroby pro i -té jednotku.

Pro zjednodušení budeme uvažovat přesnost definovanou vztahem (6.27):

$$\Delta \bar{N}_i = \frac{P_s}{m} \quad (6.27)$$

kde

$\Delta \bar{N}_i \dots$ průměrný výrobní přírůstek jednotky, která odpovídá zátěži

$m \dots$ je počet jednotek, $m < n$,

Přírůstek nákladových jednotek může tedy být:

$$\Delta K_f = \delta \bar{N}_i \sum_{i=1}^m k_i = \frac{P_s}{m} \sum_{i=1}^m k_i \quad (6.28)$$

Poté obdržíme:

$$\frac{dK_f}{d(N_i + P_s)} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m k_i \quad (6.29)$$

nebo

$$\frac{dk_f}{d(N_1 + P_s)} = \bar{k} \quad (6.30)$$

kde

$\bar{k} \dots$ je průměrná hodnota relativního přírůstku pro jednotky odpovídající změně zátěže. Nebo-li odpovídající výrobní křivce.

V praxi se pro optimální energetickou akumulaci uvažuje následující kritérium:

$$\bar{k}_2 \eta_s - \bar{k}_1 = 0 \quad (6.31)$$

kde

$\bar{k}_2, \bar{k}_1 \dots$ jsou průměrné výrobní přírůstky pro výrobní jednotky, které jsou zatíženy kvůli participaci na akumulaci.

Toto kritérium (6.31) podle [66] může být použito pro základní optimalizační model ve spolupráci s klasickými (tepelnými) zdroji energie.

Obdobně kritérium lze využít i na systémy s OZE. Je však potřeba vzít v úvahu, že palivové náklady jsou nulové, ale investiční jsou mnohem vyšší. Je tedy možné zahrnout i náklady na vedení (můžeme je zahrnout i do konvenčních zdrojů elektrické energie).

6.5 Využití v soustavě Smart Grid – Základní pojmy

Tab. 6.3: Porovnání současných distribučních sítí se systémy Smart Grid [25]

Preferovaná charakteristika	Současné síť	Chytré síť (Smart Grid)
Uvědomělý spotřebitel	Spotřebitel není informován, nejeví zájem	Spotřebitel informován, participuje na dění v síti
Zahrnutí 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	Plné 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 poruch 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 Grid je novým pojmem v energetice. V řadě odborných publikací a nejen zahraničních jsou některé pojmy zaměňovány nebo špatně interpretovány. Jsou to:

- centrální zdroj,
- decentralní (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 chladící 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.

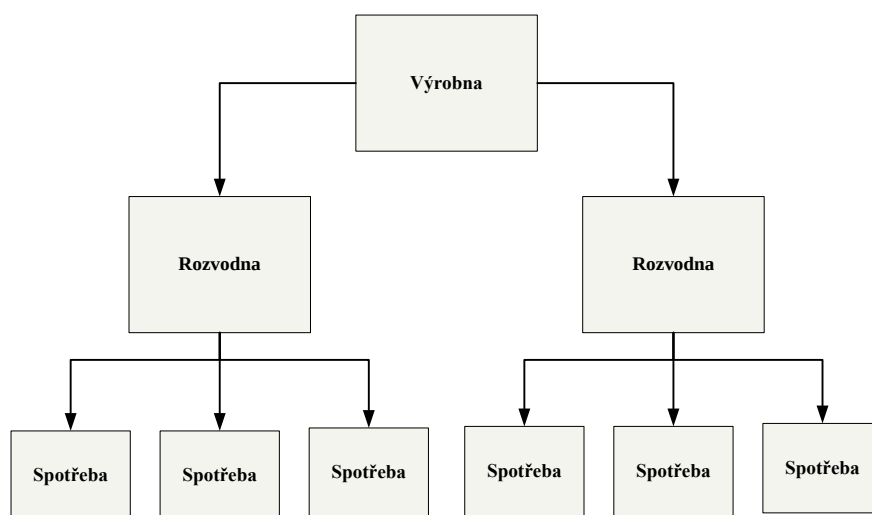
Virtuální elektrárny je pojem, který je především využíván při obchodování s elektrickou energií. Pomocí „virtuální elektrárny“ je obchodník schopen dodávat elektřinu (kterou předtím nakoupil), aniž by disponoval opravdovou kapacitou. Dnes je spíše tímto pojmem myšleno sjednocení

mnoha malých zdrojů do jednoho řídicího centra, které vytvoří jeden „velký“ blok.

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 6.2. 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 podobně.

Velice důležitou vlastností bude legislativní uspořádání a definování chování celku, tedy jak výrobce, tak spotřebitele energie. Dalším důležitým rysem chytrých sítí je **synergie** jednotlivých členů zastoupených a provozovaných v síti.



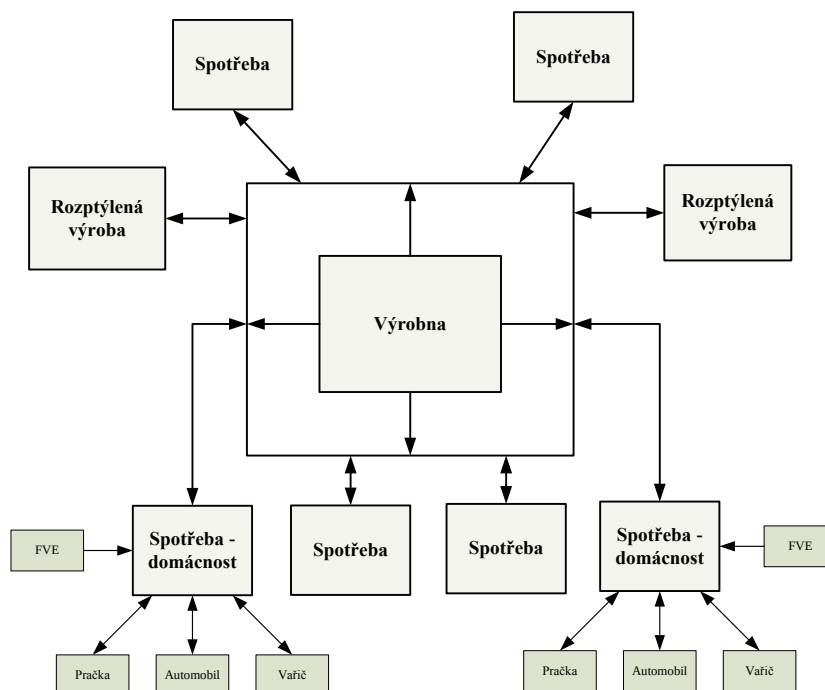
Obr. 6.2: Klasická topologie sítě

Definice Smart Grid (SG) je v podstatě velmi problematická. Existuje řada aspektů, podle kterých je možné učinit závěry, které budou specifikovat požadavky na SG (obrázek 6.3).

Skupina ERGEG (European Energy Regulators) definuje Smart Grid jako inteligentní síť, které umožní nákladově efektivní chování uživatelů sítě a tím dosáhnout vysoké míry efektivity, spolehlivosti, kvality elektrické energie s nízkým environmentálním dopadem [44].

Evropská platforma pro energetiku považuje SG za síť, které:

„Smart Grid je elektrická síť, která umí inteligentně integrovat veškeré funkce všech připojených zařízení – generátorů i spotřebičů tak, aby byla zajištěna efektivní, ekonomická a bezpečná dodávka elektrické energie“ [59].



Obr. 6.3: Topologie sítě založená na Smart Grid

Americká komise při ministerstvu energetiky USA, pro rozvoj těchto sítí předpokládá poněkud odlišnější výstup z aplikací SG:

„Smart Grid je samo uzdravující se síť, umožňující aktivní spolupráci odběratelů, provozovaná s odolností proti útokům a přírodním katastrofám, přizpůsobená všem druhům zdrojů i způsobům ukládání energie, umožňující uplatnění nových produktů, služeb a obchodování, provozovaná efektivně, s vysokou kvalitou pro potřeby moderní ekonomiky.“ [59].

Podle navržených základních vývojových diagramů je řada SG chápána spíše jako malá micro-grid síť, která je schopná pružně reagovat na poptávku/nabídku elektrické energie.

U chytrých sítí můžeme definovat klíčové požadavky, které jsou kladeny na síť další generace:

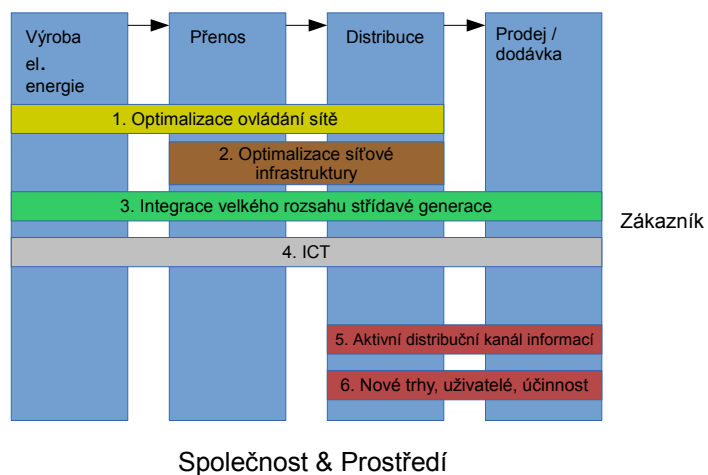
- nasazení akumulačních prostředků,
- komplexní komunikační protokoly,
- fyzická přeměna dosavadní struktury,
- ekonomická výhodnost,
- přijetí ze strany spotřebitelů.

Řada akumulačních aplikací směřuje k malým decentrálním systémům, které jsou základem SG. Bez jakýchkoliv akumulačních prostředků není možné zprovoznit ani udržovat SG, popřípadě malé nezávislé (disperzní) oblasti.

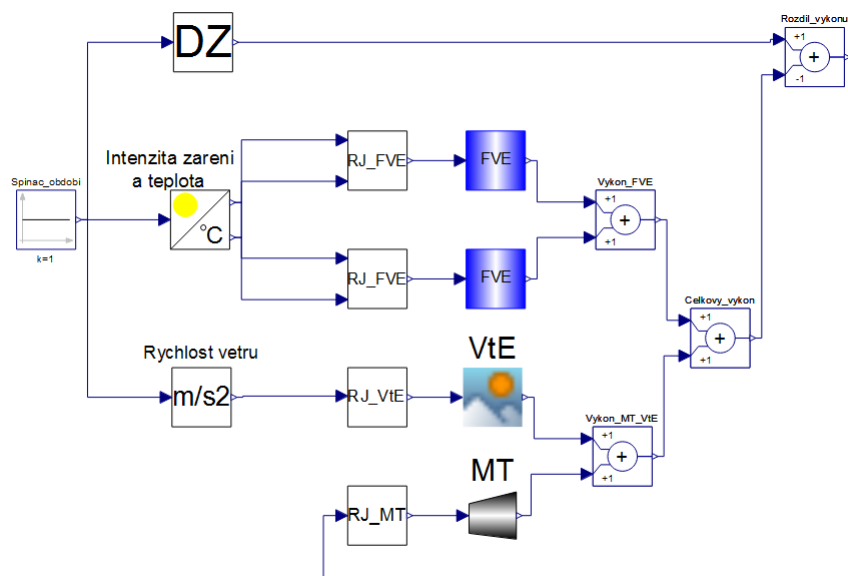
Na základě předchozích úvah byla ve spolupráci s diplomantem Ľubošem Cabalou vytvořena malá mikro síť a bylo testováno, jak se budou chovat jednotlivé výrobní bloky. Pro testování byla využita reálná klimatická data, poskytnutá Českým hydrometeorologickým ústavem a spotřeba elektřiny byla převzata z reálných 15-ti minutových odečtů z distribučního transformátoru.

Model předpokládá využití jedné větrné a jedné FV elektrárny, doplněný o spalovací turbínu. Průběhy lze simulovat pro roční minima i maxima v odběru el. energie, tak v jednotlivých čtvrtletích. Vše bylo modelováno opět v prostředí Modelica®.

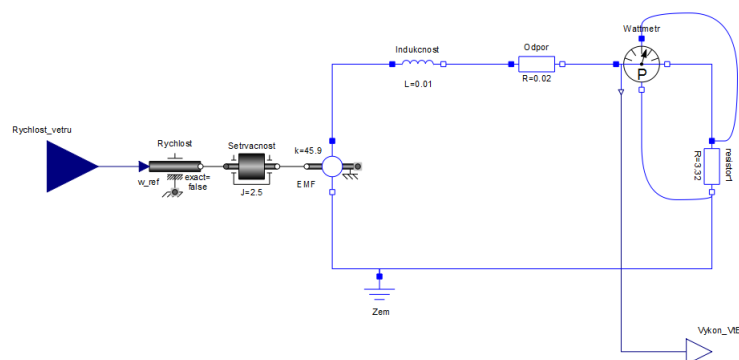
Ukázka grafického výstupu simulace je na obrázcích 6.10 a 6.11.



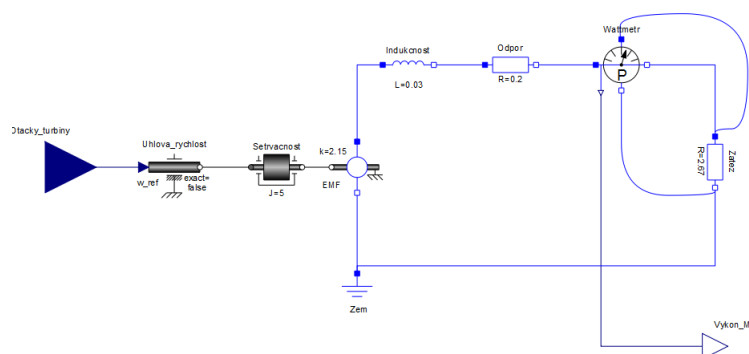
Obr. 6.4: Model SG sítě



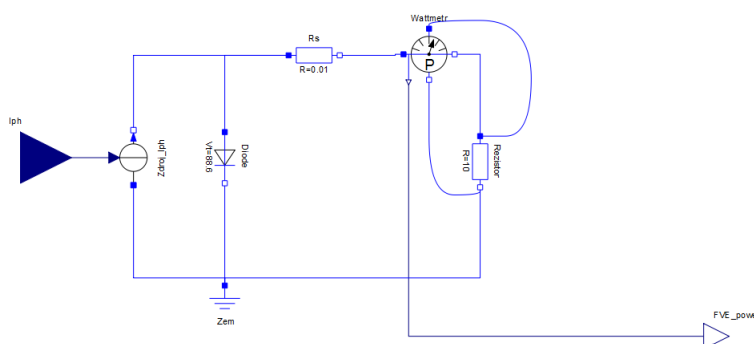
Obr. 6.5: Model pro zjištění chování v malé microgrid síti [8]



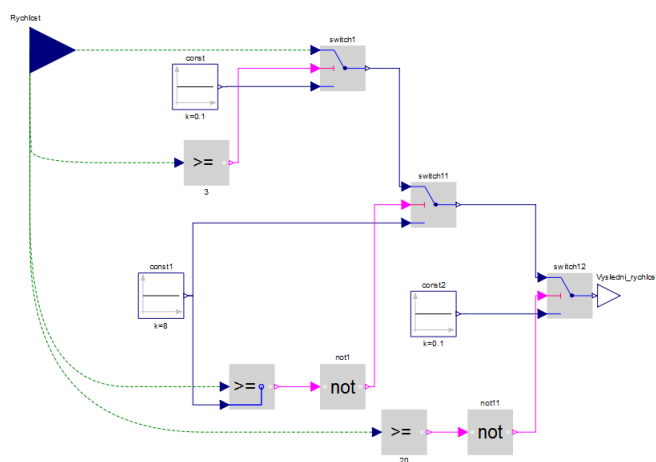
Obr. 6.6: Jednoduchý model větrné elektrárny. Jednotlivé bloky jsou tvořeny ze podbloků. [8]



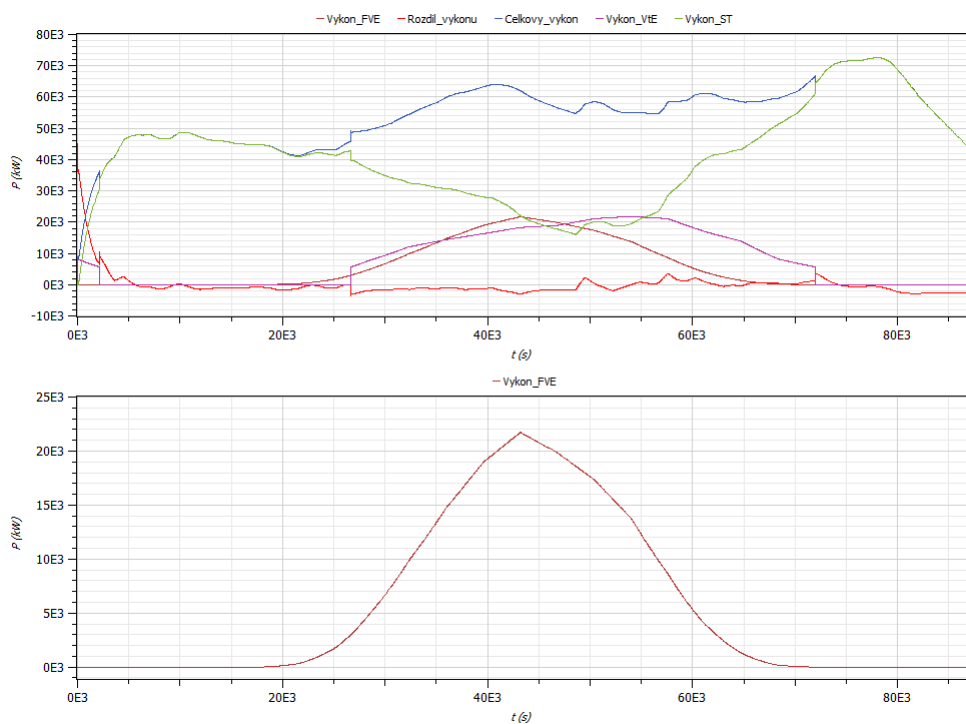
Obr. 6.7: Model reprezentující dodatečný generátor [8]



Obr. 6.8: Model fotovoltaiického panelu. Paralelní odpor je zakomponován přímo v diodě. [8]



Obr. 6.9: Submodel pro regulaci větrné elektrárny. Ostatní regulační systémy jsou založeny na podobné filosofii [8]



Obr. 6.10: Průběhy výstupních veličin pro jeden den



Obr. 6.11: Detail hodnot pro druhé čtvrtletí a denní průběh

Testování bylo provedeno s následujícími parametry:

1. den s maximálním průběhem spotřeby,
2. den s minimálním průběhem spotřeby,
3. průměrný průběh zatížení za I. čtvrtletí,
4. průměrný průběh zatížení za II. čtvrtletí,
5. průměrný průběh zatížení za III. čtvrtletí,
6. průměrný průběh zatížení za IV. čtvrtletí,

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 obrázcích 6.10 a 6.11 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.

Na základě dosažených výsledků můžeme konstatovat, že spalovací turbínu (motor) nelze nahradit akumulátorem, protože doba chodu spalovací turbíny je natolik velká, že není prostor pro použití akumulátoru (odběr elektrické energie je kontinuálně příliš vysoký – chybí časový prostor pro nabíjení akumulátoru). Ten lze využít pouze za předpokladu zastavení větší oblasti VTE a tím pádem dosažení zvýšených elektrických toků, které zajistí nabíjení akumulátoru mimo dobu využívání energie.

6.5.1 Omezení disharmonie výroby regulací spotřeby

Výkyvy mezi dodávkou a výrobou lze také regulovat na úrovni spotřeby elektřiny. Samotná regulace je ale velmi obtížná. Jediným systémem, který by umožňoval automatickou a na člověku nezávislou redukci spotřeby elektřiny v závislosti na aktuální výrobě elektřiny, je akumulovat dodávky elektřiny. Principiálně jde o několik metod, kterými lze eliminovat proměnlivost výroby:

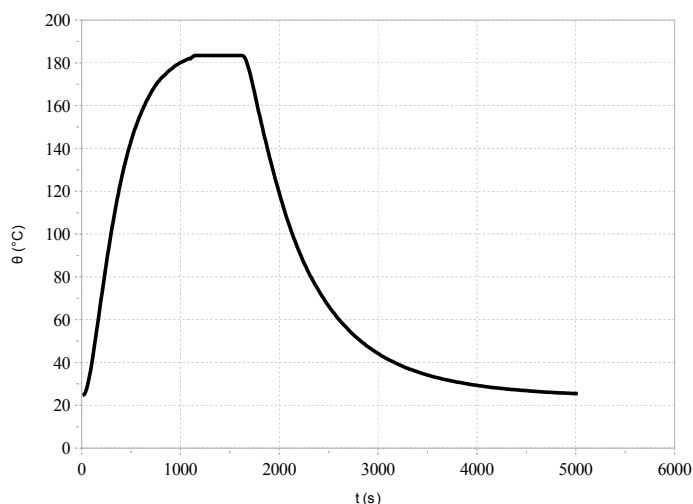
- tepelnou akumulací,
- odpínáním – připínáním spotřebitelů.

Obě verze jsou ale z hlediska rychlého řízení velmi problematické.

Přetěžování lze také řešit regulací soustavy. Samočinná regulace je také založena na regulačních frekvenčních relé, které pracují v oblasti (49,8 – 50,2) Hz a odepínají výrobní při překročení frekvence 50,2 Hz (typicky nastavení pro FVE). Pro tyto případy je vhodné zapojení akumulátorů (podobné systémy řeší v zahraničí např. [71]). V citované literatuře je řešena frekvenční regulace pomocí olověných akumulátorů. Odebráním nebo vstřikováním proudu do obvodu je možné řešit frekvenční problematiku poměrně dobře. Dnes se tak děje zejména při regulaci přenosové sítě na základě PST transformátorů¹⁰.

Tepelná akumulace

Jedná se zejména o regulaci prostřednictvím zásobníků tepla. V současné době je tato metoda využita v systémech HDO. Na obrázku 6.12 je zobrazen skutečný průběh ohřevu a ochlazování mosazné tyče. Je vidět, že rychlost reakce je značně omezená. Většina materiálů není schopna reagovat pružně tedy, nemají možnost rychlého náběhu a opačně rychlého odpadnutí. Ale mají velký význam pro akumulaci tepelné energie v prostředí teplotenských celků. I to je jeden z důvodů přechodu z parního na horkovodní vytápění.



Obr. 6.12: Akumulace tepla do mosazné tyče

¹⁰PST - Transformátor s fázovým posunem (Phase-shifting transformer) – speciální druh transformátoru, kterým lze regulovat úhel napětí a jeho prostřednictvím regulujeme tok činného výkonu

Regulace sítě odpínáním nedůležitých spotřebičů

Rozhodnout, který spotřebič není nutný k zajištění důležitého provozu je nesmírně náročné. V této části je nutná spolupráce obyvatel regulované oblasti. Výhodou by byla plynulá přeměna chování účastníků na systém s méně zatíženou sítí. V současné době je možné regulovat takto soustavu systémem HDO, který je nedílnou součástí české energetiky několik desetiletí. Moderní elektroměry mají velmi progresivní vlastnosti. Umožňují dálkové odečty a také plynule spínat spotřebiče v dobách mírného zatížení (pro spotřebitele je to výhodné – nižší zátěž znamená nižší cenu elektrické energie).

Aktuální možnost kooperace se spotřebiči je ale stále omezená. Pokud by mělo dojít k automatické regulaci spotřeby, je nutné vybavit zejména domácnosti (50 % el. energie spotřebují domácnosti) novými přístroji a posílit vnímání obyvatelstva k ekonomicko-sociálnímu chování s ohledem jak na potřeby sítě, tak obyvatel.

Kapitola 7

Návrh malého akumulčního systému

Většina FVE se v dnešní době uplatňuje pouze jako malý zdroj energie pro využití na rodinných domech. Pro autonomní systémy, ke kterým můžeme rodinné domy, chalupy a jiná podobná sídla považovat, je důležité správně nakonfigurovat zdroj, akumulátor a vedení s ohledem na energetickou potřebu objektu.

Tato činnost je komplikovaná, protože neexistuje typový objekt, který by mohl být empirickým příkladem návrhu soustavy. V této chvíli se řeší podobné projekty čistě „náhodně“, kdy akumulátory jsou zhruba navrženy na spotřebu domu. Pokud jejich kapacita nestačí, jsou připraveny další.

7.1 Autonomní objekt

Pro návrh systému lze využít sofistikovanějších metod. Jednu z nich například popisuje ve svých člancích dr. Markvart [47]. U malých sídel je kombinace FVE a VTE velice častá, proto také jejich oblast působení musí vytvořit pracovní bod, který se mění na základě aktuálních podmínek – není pevně dán.

Vždy se jedná o přesný výčet spotřebičů, které jsou zapojeny v autonomním systému. Samozřejmě se musí počítat s koeficientem využití, který je rozdílný pro jednotlivé spotřebiče. Dále je potřebné se rozhodnout, jakým napětím bude objekt napájen. Měníče DC/DC nebo DC/AC mají svou vlastní spotřebu a účinnost.

Budeme-li uvažovat, že objekt napájíme pouze z fotovoltaického zdroje, potom potřebná plocha panelů bude:

$$A_{p0} = \frac{E_s}{I_d} \quad (\text{m}^2) \quad (7.1)$$

kde

$E_s \dots$ je celková denní spotřeba elektřiny (Wh)

$I_d \dots$ je celkový dopadající výkon na panely (Wh.m²).

Jestliže budeme uvažovat dodatečné ztráty (někdy nazývané systémové), potom musíme potřebnou plochu vynásobit korelačním faktorem $C_A (> 1)$. Vztah přejde na:

$$A_p = C_A A_{p0} \quad (\text{m}^2) \quad (7.2)$$

Při návrhu instalací by se měla uvažovat historická spotřeba objektu, nejlépe v průběhu celého roku. Následně můžeme vycházet z pohledu [47], který definuje proměnou n_c jako počet dní. Nastane-li situace, že denní záření je menší než aktuální spotřeba E_s respektive, záření I_{dd} je nižší než dlouhodobý průměr I_d , potom se energetická bilance změní na:

$$E_v = n_c A_p I_{dd} \quad (\text{Wh}) \quad (7.3)$$

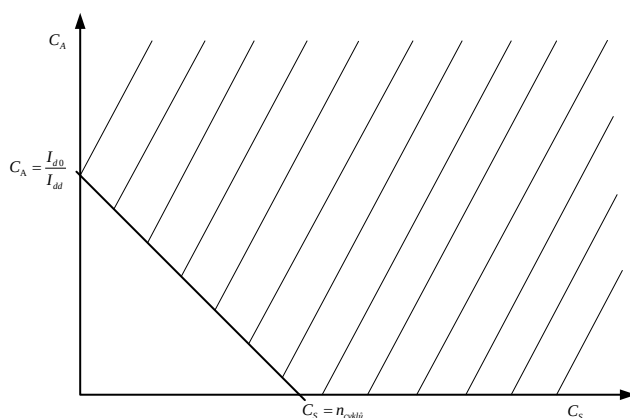
Zohledníme-li spotřebu energie objektem E_s je nutné použít zálohovací zařízení, které pokryje dodávku energie i mimo maximální podmínky – akumulátor. Jeho kapacita (v jednotkách Wh) bude:

$$Q \geq n_c(E_s - A_p I_{dd}) \quad (7.4)$$

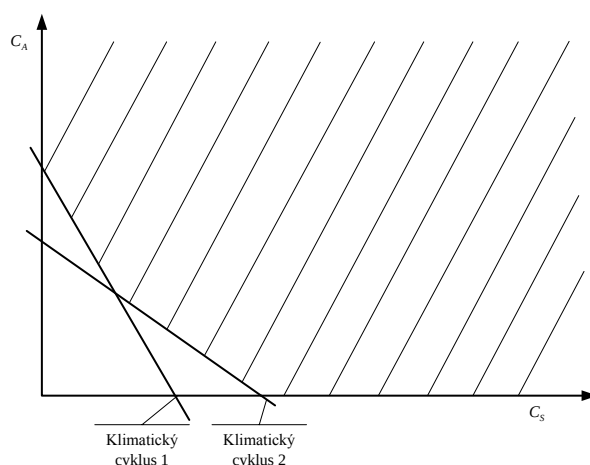
Použitím koeficientu C_A a (jak deklaruje [47]) definováním počtu dnů autonomie $C_S = Q/E_s$, obdržíme tvar:

$$\frac{C_S}{n_c} + \frac{I_{dd} C_A}{I_d} \geq 1 \quad (7.5)$$

Tato rovnice 7.5 je důležitá pro pochopení různých klimatických jevů. Graficky lze problematiku popsat následovně:

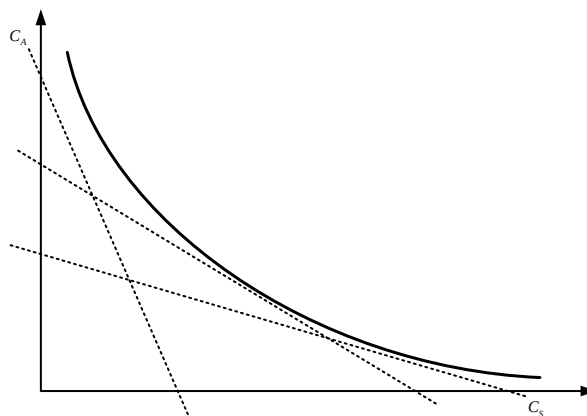


Obr. 7.1: Konfigurační rovina daná 7.5

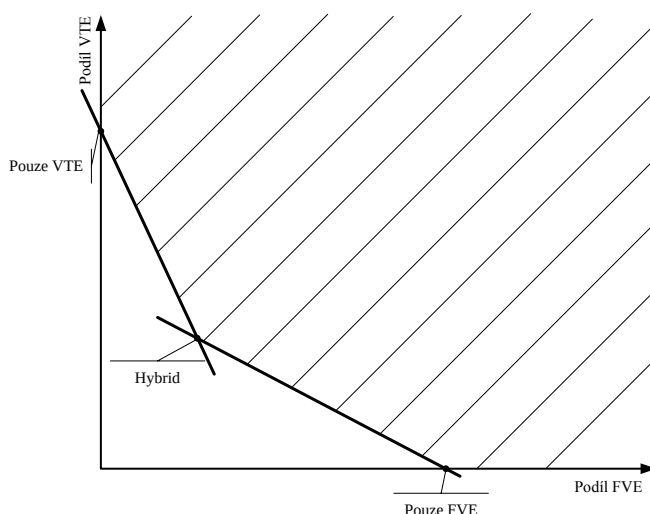


Obr. 7.2: Konfigurační rovina daná rozdílnými klimatickými podmínkami 7.5

Po složení několika místních klimatických podmínek vyjde celková dimenzační křivka. Grafický návrh také může pomoci návrhu hybridního systému založeného na větrné a fotovoltaické elektrárně. Použitím obou systémů docílíme vzájemné kooperace. Z dlouhodobých měření hydro-meteorologických ústavů vyplývá, že v zimním období převládá větrné klima nad energetickým příjmem z FVE. V létě je tomu naopak. Celkové energetické zisky se tedy vyrovnávají skrze přírodní podmínky. Odpadá nutnost budování velkého zásobníku energie.



Obr. 7.3: Dimenzační křivka pro limitní přechod různých klimatických cyklů [47]



Obr. 7.4: Stejného principu lze použít i pro návrh hybridního systému [48] – upraveno autorem

7.2 Návrh malého zásobníku pro autonomní objekt

Při konkrétním návrhu samostatného systému založeném na OZE pro napájení malých bytových, zahradních nebo jiných objektů je zapotřebí znát průměrnou a špičkovou spotřebu elektřiny. Z předchozích znalostí si ukážeme návrh na konkrétním příkladu. Je potřeba si uvědomit, že řada návrhů vychází z empirického zjištění a návrh je zpravidla správný, maximálně s minimálními odchylkami.

7.2.1 Příklad návrhu akumulčního soustavy

Jako příklad použijeme malý autonomní objekt, který je napájen FV zdrojem.

- **Spotřeba objektu** se skládá z osvětlení, provozu televizoru, vaření, čerpání vody, chladničky aj. Celkový příkon je uveden v tabulce 7.2. Tato zátěž je konstantní po celý rok. Zátěž se vytvářela v souladu s předpokladem roční spotřeby elektřiny v domácnosti na úrovni 1,8 MWh.

Na základě zátěže spočítáme celkovou energii spotřebovanou za den: $E_{celk} = 4,81 \text{ kWh}$.

- **Parametry zdroje elektřiny** Zdrojem jsou FV panely (například systém s instalovaným výkonem 1000 Wp – 4 panely s nominálním výkonem 250 Wp). Takový systém vyrobí za jeden sluneční den v letním období (1100 kWh/m^2 při $AM=1,5$ a teplotě 20°C) při započtení

ztrát 3,84 kWh (zdroj: PVGIS¹¹). Je vidět, že je hodnota malá, proto musíme zvýšit počet panelů. Naopak v zimní období je výroba jednoho panelu pouze 260 Wh. Tudíž jsme nuceni použít 17 panelů. Tato hodnota koresponduje i s programy Homer Energy a PVSyst, jejichž výsledky jsou uvedené v přílohách A a B.

- **Návrh akumulace** Hledáme-li například týdenní akumulaci, je nutné hodnotu E_{celk} vynásobit 7. A tak podobně pro měsíc, rok. 4,81 kWh jsme schopni pokrýt výrobou a akumulací. Započteme-li ztráty systému, které mohou činit až 25 %, obdržíme potřebnou hodnotu akumulátoru přibližně 42,08 kWh. Návrhu odpovídá kapacita akumulátoru $Q = 1753\text{Ah}$ (při napětí rozvodu – 24 V). Při rozvodu 12 V – poté $Q = 3507\text{Ah}$. Většinou se ale týdenní akumulace nevyžaduje a záleží na provozovateli a estimaci, který nejlepší typ zvolit.

7.2.2 Výběr akumulátoru

Z předešlých kapitol (4.1) je jasné, že můžeme použít velmi rozličné druhy akumulátorů. Pro malé jednotky jsou však jejich instalační náklady příliš vysoké. Výběr shrnuje například graf v **příloze D**. Na základě toho se pro menší objekty používají pouze olověné akumulátory a lithiové akumulátory ve verzi LiFePO_4 . Základním ukazatelem je parametr vybíjení. Z předešlého příkladu je patrné, že se počítá s poměrně hlubokým cyklem, s SOC pohybujícím se v rozmezí (20 – 100) %.

Proto lze vyslovit hypotézu, že pro případ je vhodné použít LiFePO_4 , která snáší hlubší vybití lépe, než-li olověný akumulátor. Naopak, zvýšíme-li kapacitu, docílíme SOC v rozmezí (60–100) %. Zde již můžeme začít uvažovat o olověných akumulátorech (například speciálních solárních, které jsou konstruované pro větší množství cyklů a hloubku vybití) s např. trubkovými elektrodami, popřípadě zesílenými deskovými elektrodami.

Konkrétní řešení je velmi závislé na typu objektu, zatěžování, hloubce vybití, teplotě provozu. Každý objekt je nutné posuzovat zvlášť. Nelze tedy vycházet pouze z obecného popisu a doporučení. Bylo vypracováno několik vzorových prací, které se zabývají touto problematikou (např. Ing. Kotěšovce [40]). Podmínky návrhu a realizace jsou velmi specifické, a proto vždy se navrhuje optimální řešení pro konkretizovaný objekt.

7.3 Softwarové řešení – HOMER, TRNSYS, PVSYST

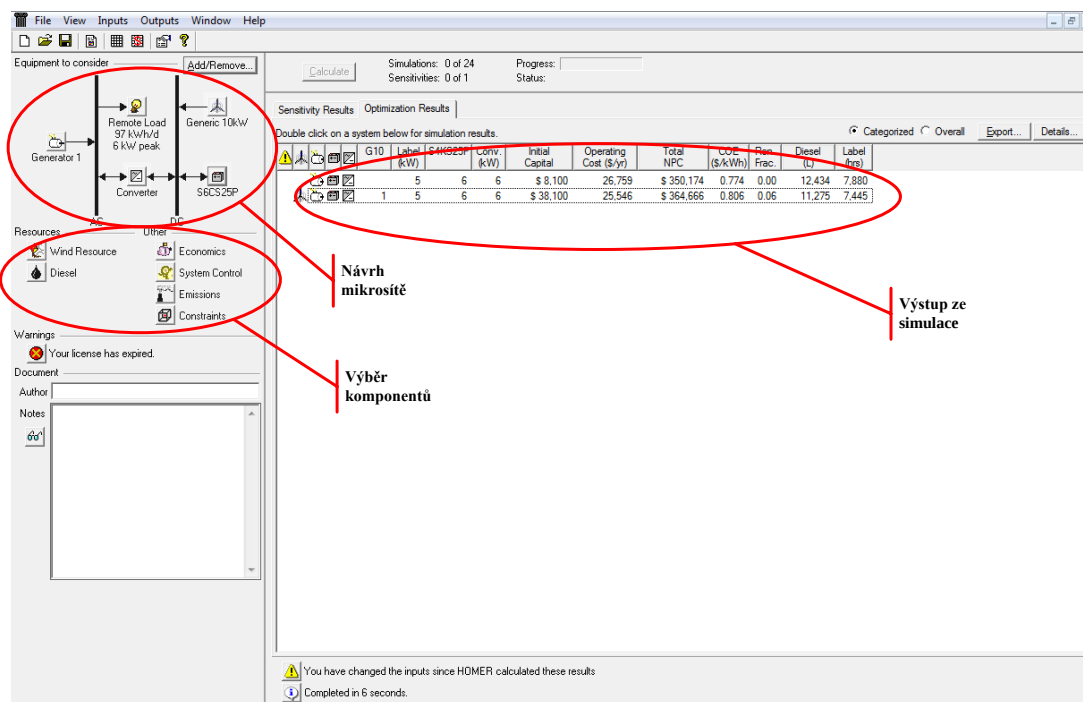
V této části si ukážeme, jaká programová prostředí můžeme využít při návrhu akumulčního (energetického) systému. V současné době je k dispozici několik softwarových aplikací, které lze využít pro návrh jak autonomního systému, tak síťového zapojení.

HOMER

HOMER je program vyvinutý na NREL¹². Softwarové prostředí umožňuje sestavit vlastní síť, včetně zdrojů a definované zátěže. Předností tohoto softwaru je, že pracuje s meteorologickými daty, které lze využít pro upřesnění celkové energetické bilance. V podstatě se jedná o řešení pro mikro síť v zapojení on-grid a off-grid. Je možno provést citlivostní analýzu sestaveného modelu a také nákladovou charakteristiku. Citlivostní analýza řeší závislost mezi cenou elektrické energie v závislosti na vstupech jednotlivých komponent a vstupních nákladů (například cena motorové nafty pro záložní dieselgenerátor). V tomto programu byl vytvořen ukázkový model mikro sítě, který byl následně testován a výsledky jsou uvedeny v příloze A. Více informací o tomto softwaru lze nalézt na stránkách NREL.

¹¹PVGIS – Photovoltaic Geographical Information System

¹²NREL – National Renewable Energy Laboratories



Obr. 7.5: Grafické prostředí softwaru HOMER

Navržený systém reflektuje požadavky, které jsou kladeny na autonomní objekt. Stejný objekt byl dále podroben srovnání v programu PVSyst, jehož výsledky jsou uvedené v dalším oddílu.

Vstupní parametry systému jsou uvedeny v tabulce 7.1.

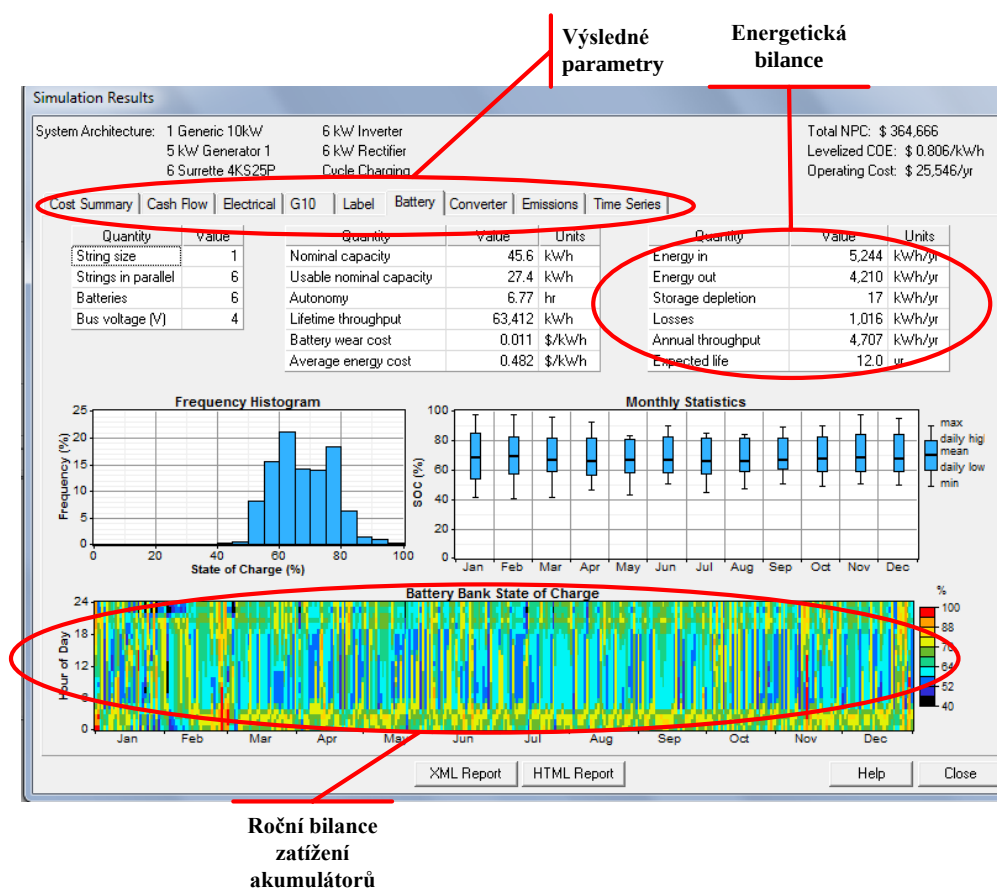
Fotovoltaický zdroj (zdroj PVGIS):

Tab. 7.1: Hodnoty průměrné dopadající energie na povrch pro oblast Brno

Měsíc	Průměrná dopadající energie (kWh.m ⁻² .den)
Leden	1,27
Únor	2,26
Březen	3,68
Duben	5,23
Květen	5,34
Červen	5,45
Červenec	5,37
Srpen	5,15
Září	4,06
Říjen	2,63
Listopad	1,48
Prosinec	1,16

Spotřeba objektu byla rozdělena následovně (tabulka 7.2):

- základní zatížení,
- odběrové špičky v době typicky zvýšené poptávky (ráno, v poledne, večer),



Obr. 7.6: Simulační výstup z HOMER

Tab. 7.2: Hodnoty příkonu pro autonomní systém

Čas (h)	Zátěž (kW)
00:00 - 01:00	0,050
01:00 - 02:00	0,050
02:00 - 03:00	0,050
03:00 - 04:00	0,050
04:00 - 05:00	0,050
05:00 - 06:00	0,050
06:00 - 07:00	0,050
07:00 - 08:00	0,050
08:00 - 09:00	0,100
09:00 - 10:00	0,500
10:00 - 11:00	1,000
11:00 - 12:00	0,300
12:00 - 13:00	0,300
13:00 - 14:00	0,500
14:00 - 15:00	0,100
15:00 - 16:00	0,300
16:00 - 17:00	0,300
17:00 - 18:00	0,300
18:00 - 19:00	0,300
19:00 - 20:00	0,100
20:00 - 21:00	0,100
21:00 - 22:00	0,100
22:00 - 23:00	0,060
23:00 - 00:00	0,050

Akumulátory Rolls Battery – Surrete 4K-S25-P jsou olověné akumulátory se základními parametry:

Tab. 7.3: Hodnoty pro akumulátor energie

Napětí	4 V
Kapacita	1900 Ah
Minimální stav nabití	20 %
Maximální nabíjecí proud	67,5 A
Životnost	12 roků
Účinnost	80 %
Minimální stav nabití	40 %
Cena článku	1500 \$

Fotovoltaické panely mají základní parametry:

Tab. 7.4: Hodnoty fotovoltaických panelů

Životnost	20 roků
Faktor sníženého výkonu	80 %
Cena	1000 \$/kWp

Typ panelu není rozhodující. Jde zejména o cenu za kWp a stárnutí panelu.

Systém testuje ekonometricky několik variant (nastavení) pro danou spotřebu. Ta se chová stejně jako inverter s měničem jako konstanty. Proměnnými jsou výkon fotovoltaického zdroje a kapacita akumulátorů.

Nejefektivnější návrh zapojení je v následující kombinaci (grafický výstup je uveden v příloze A):

- fotovoltaický zdroj: výkon 4 kWp,
- akumulátor: 12 ks oloveného akumulátoru, životnost: 10 roků, možnost využití 100 % SOC
- inverter: výkon 2 kW, účinnost: 96 %,
- usměrňovač: výkon 2 kW, účinnost: 90 %,
- spotřebič: průměrná denní spotřeba: 4,81 kWh/d,
- roční úroková míra: 3 %.

Z průběhů v příloze A lze odvodit, že akumulátor bude přes léto pracovat vždy při maximální kapacitě, respektive fotovoltaický zdroj bude schopen dodávat požadovaný výkon. V měsících s nižším osvětlením bude akumulátor pracovat až na hladinu nabití 50 %. To zaručuje deklarovanou životnost akumulátoru – 10 roků. Usměrňovač (Rectifier) je nezatížen tzn., že energie na dobíjení akumulátorů není brána ze sítě AC (autonomní provoz).

PVSYST

Jedná se o výkonnou aplikaci určenou pro návrh a realizaci FV elektráren. Výhoda systému je v jeho dokonalém návrhu FVE včetně akumulace. Pracuje s meteorologickými daty s dlouhou historií, proto výsledky korelují se skutečnými podmínkami. Výstupem jsou nejen grafické závěry (ztráty systému, rozvržení apod.), ale i základní ekonomické hodnocení. Jedná se o komerční aplikaci. Vůči předchozímu softwaru je tento poměrně výkonnější v oblasti FVE a v závěrech z nich plynoucí. Přesto pro simulaci menších sítí (mikro) není vhodný. Výstupy a ukázky z tohoto programu jsou uvedeny v příloze B. Testován byl stejný obdobný systém jako v prostředí Homer.

TRNSYS

TRNSYS¹³ je program pro vytváření a simulování různých energetických bloků. Při prvním pohledu je velmi podobný Modelice. Jedná se o blokově orientované programování, s překladačem do jazyka C. Je vyvíjen na univerzitě ve Wisconsinu. Jedná se také o komerční verzi. Silná stránka programu je v jeho modulárnosti. Zejména je vhodný pro simulace v oblastech tepelných pochodů. Jelikož je vyvíjen pro potřeby OZE, jsou zde zakomponovány také bloky s palivovými články (AFC, PEMFC). Simulační výsledky jsou uvedeny v příloze práce C.

¹³A TRaNsient SYstems Simulation

Kapitola 8

Ekonomika provozu bateriových systémů v energetické síti

V této kapitole je řešena problematika ekonomických ukazatelů, které významnou měrou přispívají k rozhodování o umístění nebo používání akumulčního systému.

Akumulační prostředky jsou pro investora důležité ze dvou důvodů:

- z legislativního,
- z ekonomického.

Pro ekonomickou část můžeme definovat dva hlavní ukazatele, pro které je vhodný jakýkoliv akumulční prostředek:

- podpůrné služby v energetice,
- domácí hybridní systémy.

Podpůrné služby v energetice jsou již delší dobu požadovány jednotlivými regulátory distribučních i přenosových sítí. Zejména potom možnost ovlivňovat prudké výkyvy mezi poptávkou a nabídkou elektřiny, která je což je v současnosti aktuální a známý problém.

Ekonomická bilance systémů tvořených akumulátory velmi závisí na druhu provozu. V současné době je použití akumulčních systémů v průmyslovém odvětví velmi omezené, ne-li mizivé. Společnosti nejsou vázány žádným zákonem, který by je nutil harmonizovat výstupní nebo vstupní výkon (typickým příkladem jsou válcovny plechů). Akumulační prostředky ale mohou najít uplatnění i v řízení celé energetické soustavy stejně tak, jako v současné době velké přečerpávací vodní elektrárny. Výhodou menších akumulčních systémů je zejména v nezávislosti na geologických podmínkách.

Pro řízení se uplatňuje několik regulačních pásem:

1. primární regulace,
2. sekundární regulace,
3. terciální regulace.

Primární regulace elektroenergetické soustavy je definována jako proporcionální charakteristika, která je uskutečňována pomocí regulace výkonu turbínu, respektive otáček a zabezpečuje

rovnováhu mezi výrobou a spotřebou elektrické energie. Regulátor by měl zabezpečovat chod soustavy podle:

$$S = -\frac{\Delta f}{\Delta P_G} \frac{P_{nG}}{f_n} \quad [\%] \quad (8.1)$$

kde

$S \dots$ je statika korektora frekvence.

Sekundární regulace je doplňková k primární regulaci. Zabezpečuje trvalou udržitelnost salda (pro malé změny $\Delta f \rightarrow 0$), které je naprogramované na regulátoru příslušné regulační oblasti. Při větších frekvenčních odchylkách (výpadek primární regulace) zabezpečuje chybějící výkon a tím vyrovnává frekvenci na požadovanou hodnotu a její meze. Sekundární regulace musí splňovat následující podmínku (proporciálně-integrační charakter):

$$\Delta P_d = -kG - \frac{1}{T_r} \int G dt \quad [\text{MW}] \quad (8.2)$$

kde

$\Delta P_d \dots$ je výstupní hodnota regulátoru [MW]

$k \dots$ je proporcionální konstanta regulátoru

$T_r \dots$ je integrační konstanta regulátoru [min]

$G \dots$ je regulační odchylka (ACE – Area Control Error).

Terciální regulace představuje manuální nebo automatický přesun pracovních bodů na strojích zúčastněných na sekundární regulaci. Cílem této regulace je především hospodárně rozdělit výkon sekundární regulace a zaručit dostatečnou rezervu sekundární regulaci v čase a výkonu. V podstatě se jedná o zapojení dodatečných zdrojů do sítě, například odpojením nebo připojením nových turbín (plynové, parní), přerozdělením výkonu zdrojů sekundární regulace, změnou programu salda v propojené soustavě a jiné [38].

Ekonomický přínos pro použití zásobníku energie je zejména v reakci na okamžité požadavky operátora trhu energií (v České republice OTE, a.s.). Operátor bonifikuje zákazníky, kteří jsou schopni okamžitě odebrat nadbytečnou energii.

Další fází může být sekundární regulace napětí

Tab. 8.1: Příklad setu doplňkových služeb a jejich kategorizace [30]

Doplňkové služby		Preferované použití	Identifikace oblastní specifikace DS	Časová odezva
Kontinuální regulace	Rotační	Primární frekvenční kontrola	RZPR	30 sekund
Kontinuální regulace	Rotační	Sekundární výkonová a frekvenční regulace	RZSR	≤ 15 minut
Energetická nerovnováha	Rotační	Následující zatížení	RZTR ⁺ / RZTR ⁻	≤ 30 minut
Okamžitá mimořádná rezerva	Netočivá	Provozní rezerva	RZQS	≤ 15 minut
Náhradní rezerva	Netočivá	Doplňková rezerva	RZN _{>30}	> 30 minut

Vysvětlivky k tabulce 8.1:

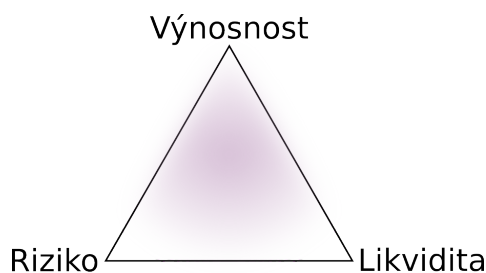
- RZPR – Regulační záloha (PR) – jedná se o točivou výkonovou zálohu, která je vyčleněna na bloku poskytujícím podpůrnou službu primární regulace f bloku
- RZSR – Regulační záloha (SR) – jedná se obecně označní točivé výkonové zálohy, která je vyčleněna na blocích poskytujících podpůrnou službu sekundární regulace P bloku.
- RZTR⁺ – Regulační záloha kladné (TR) – jedná se o (točivou) výkonovou zálohu „směrem nahoru“, která je vyčleněna na bloku poskytujícím podpůrnou službu terciální regulace P bloku.

- $RZTR^-$ – Regulační záloha záporné (TR) – jedná se o (točivou) výkonovou zálohu „směrem dolů“, která je vyčleněna na bloku poskytujícím podpůrnou službu terciární regulace P bloku.
- $RZQS$ ($RZQS_{15}$) – Rychle startující 15-ti minutová záloha – jedná se o blok, který je do 15 minut od příkazu Dispečinku ČEPS schopen poskytnout předem sjednaný výkon.
- $RZN_{>30}$ – Regulační záloha (netočivá) dosažitelná nad 30 minut (může zahrnovat více složek).

8.1 Vymezení základních pojmů

V obecném pojetí je každá investice rizikem. Tento pojem představuje graficky obrázek 8.1. Základními pojmy pro každou z investic je vymezení se na:

- **Výnosnost** - je vyjádřena peněžním přínosem, který je očekáván za dobu životnosti zařízení. Někdy je také uváděna jako ekonomická životnost investičního projektu.
- **Riziko** - představuje pravděpodobnost nedosáhnutí předpokládaných výnosů a výsledků z projektu.
- **Likvidita** - vyjadřuje dobu přeměny investičních výdajů na peněžní příjmy.



Obr. 8.1: Magický trojúhelník investování

8.2 Vstupní parametry modelu

Vstupními parametry jsou zejména cena elektrické energie (výrobní a prodejní cena). Cena akumulačního média, celková doba životnosti a také počet cyklů, které předpokládáme, že skladovací systém bude muset *zvládnout*.

8.3 Základní investiční pravidla

Během rozhodování, jaké akumulační médium použít, se velice často přihlíží spíše než k technickým aspektům k aspektům ekonomickým. Pro koncového uživatele (energetiky nebo domácnosti) je ekonomika provozu a zejména investiční náklady rozhodujícím činitelem.

Existují známé investiční odhady, které jsou založeny na několika předpokladech:

- investiční náklady,
- doba provozu zařízení,
- předpokládaný výnos zařízení,
- úroková míra v daném roce provozu,
- daně.

Pro předem definované parametry byly vytvořeny modely, které respektují výše zmíněné podmínky a dále také **Odpisové skupiny**, u kterých se tato položka také hodnotí. Výsledkem je souhrn, který by měl napomoci při rozhodování o použité technologii.

8.3.1 Použité ekonometrické metody

- Podle zohlednění času
 - metoda statická,
 - metoda dynamická.
- Podle efektivity investice
 - nákladové metody (jako kritérium hodnocení bývá úspora nákladů),
 - ziskové metody (kritérium čistého zisku),
 - příjmové metody (kritérium peněžní příjem, tj. čistý zisk spolu s odpisy).

Z hlediska používaných metod hodnocení efektivnosti investic můžeme použít následující:

- metoda průměrných ročních nákladů (annual cost),
- metoda diskontovaných nákladů (discounted cost),
- metoda čisté současné hodnoty (net present value)
- metoda indexu ziskovosti (profitability index),
- metoda vnitřního výnosového procenta (internal rate of return),
- metoda průměrné výnosnosti (average rate of return),
- metoda doby návratnosti (payback period).

Celkový přehled metod vyjadřuje tabulka 8.2.

Použití těchto metod je v obecné rovině vnímáno pouze jako prvek hodnocení investice především v korporátní sféře. Metody jsou ale velice obecné a tím pádem je lze využít na hodnocení i akumulčních prostředků pomocí softwarového řešení na úrovni lokálních akumulčních systémů v distribučních sítích.

Obecně se dá říci, že čím kratší doba úhrady dané investice, tím je příznivější, protože dosahuje vyšší reálné výnosnosti, nebo-li se tím zvýší likvidita. Samozřejmě je tím i investice bezpečnější z pohledu investora [51].

Tab. 8.2: Srovnání jednotlivých metod [33]

	Technika	Nákladové metody	Ziskové metody	Metody čistých peněžních příjmů
Statické metody	Porovnání nákladů	•		
	Porovnání zisku		•	
	Porovnání rentability		•	
	Doba návratnosti		•	•
Dynamické metody	Čistá současná hodnota (NPV)			•
	Index ziskovosti			•
	Vnitřní výnosové procento			•
	Diskontovaná doba návratnosti			•
	Modifikované vnitřní procento			•
	Konečná hodnota			•
	Čistá konečná hodnota s návratností			•
	Metoda diskontovaných nákladů	•		
	Ekonomická přidaná hodnota			•

Metoda doby návratnosti Je to jedna z nejméně přesných metod. Někdy je také označována jako doba úhrady.

$$I = \sum_{n=1}^{DU} P_n \quad (8.3)$$

kde

I ... kapitálový výdaj

P_n ... peněžní příjem

n ... jednotlivá doba životnosti

DU ... doba návratnosti (doba úhrady)

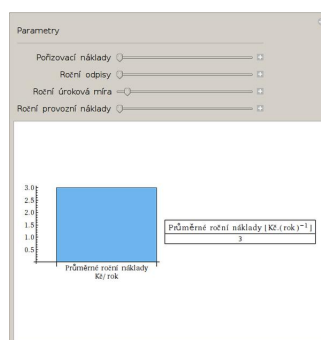
Metoda nepočítá s žádnými aktualizovanými příjmy. Jde pouze o prostou dobu návratnosti. Pakliže budeme uvažovat faktor času, potom vztah 8.4 musíme upravit následovně:

$$I = \sum_{n=1}^{DU} P_n \frac{1}{(1+i)^n} \quad (8.4)$$

kde

i ... diskontovaná míra

Metoda průměrných ročních nákladů (annual cost) Reflektuje pouze základní metodu hodnocení investic

**Obr. 8.2:** Grafický výstup s proměnnými parametry

Metoda Čisté současné hodnoty (NPV)

Metoda patří mezi nejpoužívanější ekonomicko-rozhodovací kritéria, podle kterých se rozhoduje, zda se investice vyplatí či nikoliv.

NPV (z anglického originálu - Net Present Value) vychází z předpokladu, že budeme uvažovat peněžní tok, který nám poplyne díky investici. Může být samozřejmě kladný (cílené) nebo záporný (investice není výhodná). V podstatě se jedná o informaci kolik peněz daná investice vydělá nebo naopak prodělá. Metoda NPV je vhodná pro krátkodobé investice (informace se různí, ale shoda je na období do 10-ti roků). Pokud bychom uvažovali investice delší (horizont okolo 20 let), potom tato metoda je dosti nepraktická. Počítá totiž s předpokladem, jaký zisk přinese investice v určeném období (a ten se může ve skutečnosti značně lišit). Jak uvádí [51], čistá současná hodnota vyjadřuje absolutní hodnotu mezi aktualizovanou hodnotou peněžních příjmů z investice a mezi aktualizovanou hodnotou kapitálových výdajů, které si daná investice vyžádala.

Nicméně pro malé jednotky, které považují hranici 10-ti roků za maximálně možnou pro investici, je tato metoda poměrně vhodná.

Matematické vyjádření čisté současné hodnoty (v angličtině: Net Present Value) je:

$$NPV = \sum_{n=1}^N P_n \frac{1}{(1+i)^n} - \sum_{n=0}^N I_n \frac{1}{(1+i)^n} \quad (8.5)$$

Někdy se můžeme setkat s upraveným vztahem:

$$NPV = \sum_{n=0}^N (P_n - I_n) \frac{1}{(1+i)^n} = \sum_{n=0}^N (FP_n) \frac{1}{(1+i)^n} \quad (8.6)$$

kde

P_n ... peněžní příjem

FP_n ... volný peněžní tok

i ... diskontovaná míra

I_n ... kapitálový výdaj

N ... doba životnosti

n ... jednotlivá doba životnosti

Jak vyplývá z rovnic 8.5 a 8.6 je určujícím předpokladem délka trvání investice a její skutečný čistý peněžní příjem (po odpisech). Diskontovaná míra je o něco složitější. Vyjadřuje jak si ceníme investici, respektive jaký předpokládáme zisk z celkové pořizovací částky, kdybychom tuto investici neprovedli. Obvykle je vyšší než běžný spořicí úrok v bance (prémie za riziko). Její vyjádření se obvykle udává v p.a. (per annun). Pokud investor trvá na měsíční bonifikaci, musí se tento aspekt zohlednit i při výpočtu.

Metoda vnitřního výnosového procenta (IRR)

Obvykle je metoda označována jako metoda vnitřního výnosového procenta, nicméně se lze setkat také se synonymy:

- Internal Rate of Return (anglicky),
- mezní míra výnosu z investice,
- vnitřní míra návratnosti,
- vnitřní výnosové procento.

IRR je druhá základní metoda k výběru investice. Jedná se vlastně o matematické upravení metody NPV. Jak ukazuje rovnice 8.7, rozdíl spočívá hlavně v definici zisku z dané investice. IRR vyjadřuje procentní výnos při diskontovaném peněžním příjmu respektive hledá právě takovou úrokovou míru, při které bude $NPV = 0$.

$$\sum_1^N \frac{CF_n}{(1 + IRR)^n} - IN = 0 \quad (8.7)$$

Pakliže bude platit:

$$IRR \begin{cases} > 0, & \text{vyplatí se} \\ = 0, & \text{neutrální} \\ < 0, & \text{nevyplatí se} \end{cases}$$

můžeme vyjádřit vhodnost dané investice.

Metoda čisté konečné hodnoty

Matematicky:

$$CKH = \sum_{n=1}^N P_n(1+i)^{N-n} - \sum_{n=0}^N I_n(1+i)^{N-n} \quad (8.8)$$

Jak vyplývá z rovnice 8.8 jedná se o metodu, která aktualizuje příjmy i výdaje. Varianta s vyšší aktualizací je výhodnější, i když všechny kladné výnosy jsou považovány za dobrou investici (přináší vyšší zhodnocení než námi určená úroková míra - alternativní investice) [51].

Metoda čisté konečné hodnoty s návratností

Tato metoda je popsána v [51]. Při bližším zkoumání autor vychází z předpokladu, cituji: „*Ve své matematické podobě počítá plochu mezi kumulovanými úročenými peněžními toky z investice a kumulovanými hodnotami úročených výdajů na investice*”. Její zkratka je LRP (lineární regulační plocha). Počítá s vyšším příjmem z investice na začátku projektu na úkor posledních let.

Opět matematicky [51]:

$$LRP = \sum_{n=1}^N \left(\sum_{m=1}^n P_m(1+i)^{n-m} - \sum_{m=0}^n I_m(1+i)^{n-m} \right) \quad (8.9)$$

Čím vyšší je hodnota LRP, tím je lepší z pohledu výnosnosti i v rámci porovnání likvidity.

Metoda ekonomicky přidané hodnoty

Tato metoda je v angličtině a i u nás často vyjádřena zkratkou *EVA - Economic Value Added*. Vyjadřuje rozdíl mezi očekávaným ziskem a kapitálovými náklady. Tento ukazatel je jeden z nejmodernějších a pochází z roku 1993. Doslovně je tato metoda vyjadřuje [51]: „*Ekonomická přidaná hodnota se rovná provoznímu příjmu z projektu po zdanění mínus výdaje na náklady alternativní příležitosti použitého vlastního kapitálu, jejichž výše odráží riziko projektu*”.

Matematicky lze výše uvedené vyjádřit jako:

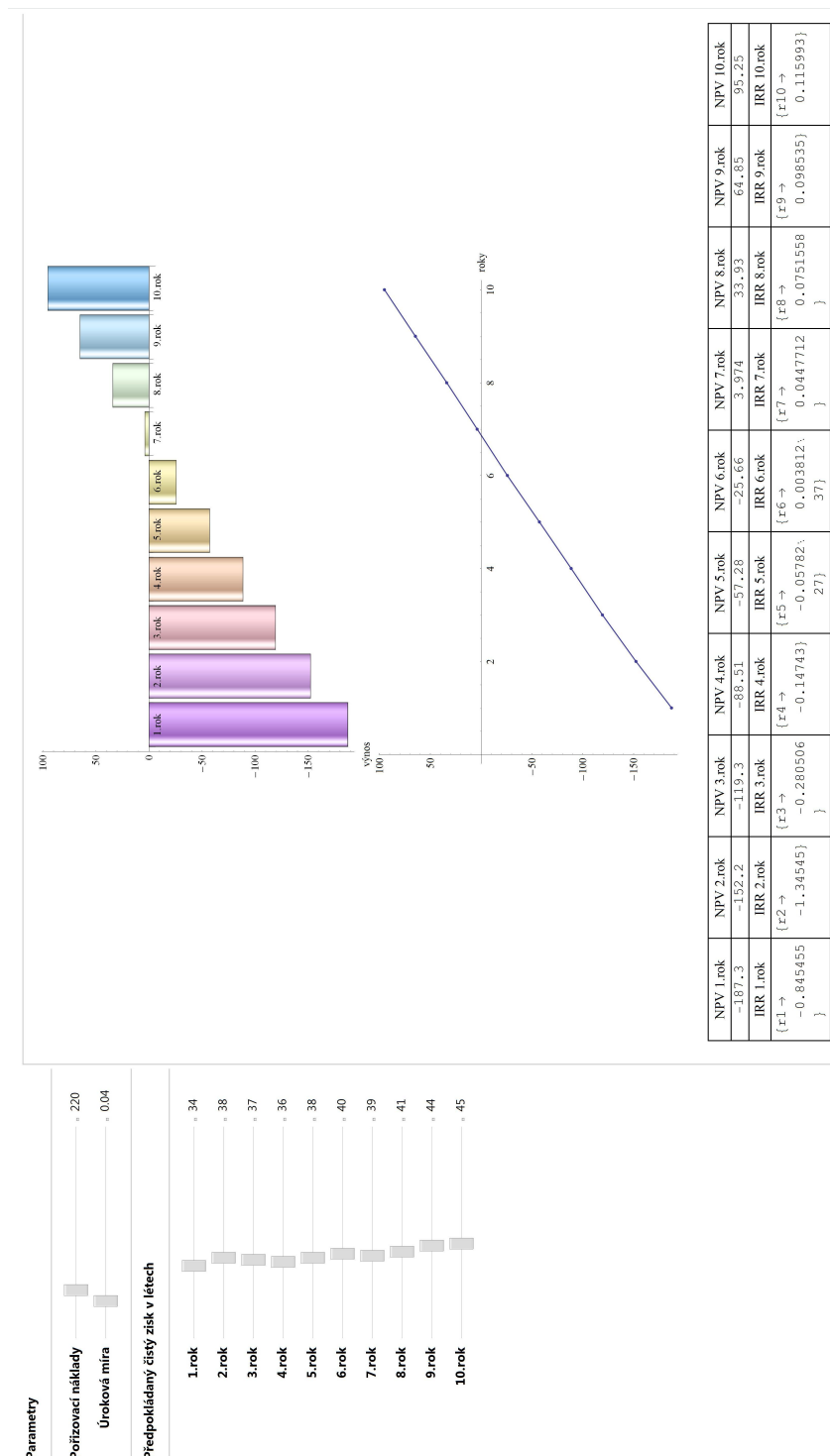
$$NPV = \sum_{n=0}^N \frac{EVA_n}{(1+i)^n} = \sum_{n=0}^N \frac{FP_n - VK \cdot r_e}{(1+i)^n} \quad (8.10)$$

kde

EVA ... je ekonomická přidaná hodnota

r_e ... je alternativní náklad vlastního kapitálu

Matematicky jde o metodu čisté současné hodnoty (NPV), která je ponížena o alternativní náklady příležitosti [51]



Obr. 8.3: Grafický výstup s proměnnými parametry pro metodu NPV

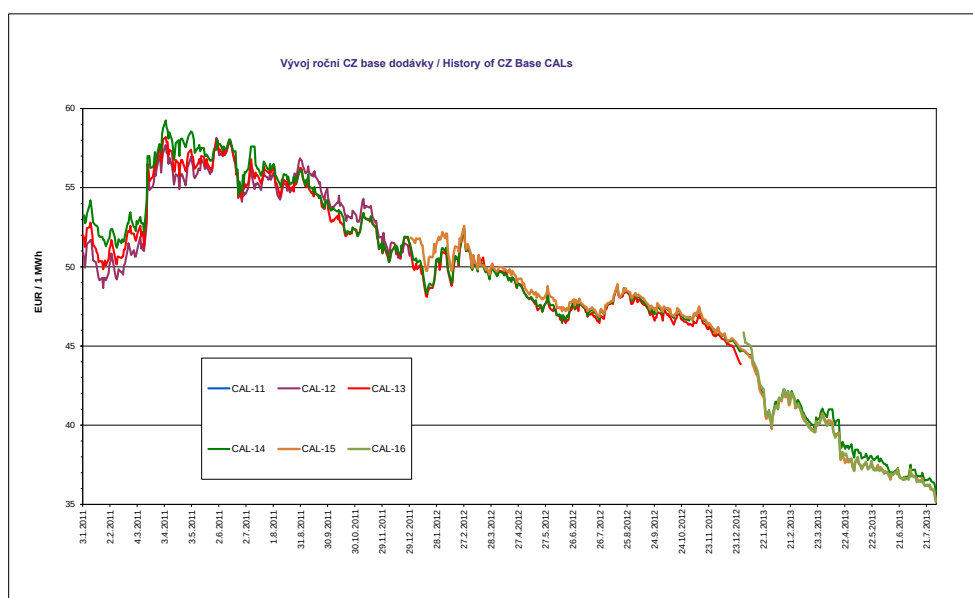
8.4 Vliv ceny na rozhodování spotřebitele

Cena elektřiny ovlivňuje chování spotřebitelů pouze v omezené míře. Obyvatelstvo není příliš zvyklé změnit své návyky. Dobré zkušenosti v tomto směru mají pilotní projekty Smart Grid, respektive v oblastech, které jsou vybaveny potřebnou technologií.

Řízení spotřeby probíhá pouze pomocí hromadného dálkového ovládání, známého jako HDO. V případě, že většina obyvatelstva bude přistupovat ke spotřebě elektřiny svými momentálními potřebami, nikdy nedosáhne regulace sítě optima. Nebo-li: řízení spotřeby je závislé na zvycích zákazníků a jejich vnímání ceny, která je změnovým faktorem rozhodování.

8.5 Vliv cen komodit na elektrickou energii

Cena jednotlivých komodit (ropa, zemní plyn, uhlí, uran) se významně podílí na konečné ceně pro spotřebitele. Dalším faktorem jsou například ceny povolenek CO₂ (většinou pouze v Evropě a v zemích, které přistoupili ke Kjótskému protokolu a podílí se na obchodech s emisními povolenkami). Velkou neznámou (v době psaní textu) je břidlicový plyn. Ve Spojených státech Amerických způsobil energetickou revoluci, kterou reprezentuje obrázek 8.6. Evropa zatím nemá zmapovány dostupné zásoby plynu. Uhlí, které je díky plynu mnohem levnější je importováno do Evropy 8.5.



Obr. 8.4: Průběh ceny silové elektřiny za posledních 3 roky (CAL – znamená kontrakt dodání)

8.6 Analýza nákladů životního cyklu akumulčních systémů

Tato kapitola předkládá významné rozhodovací prvky, které jsou nutné pro správný výběr akumulčního systému. Analýza nákladů životního cyklu technologií pro EES je odvozen z anglického originálu – LifeCycle Cost Analysis of Technology for EES – a popisuje několik druhů akumulčních prostředků, z pohledu ekonomického života.

Na toto téma byly zpracovány studie ¹⁴, které jsou vztaženy většinou k prostředí Spojených států amerických.

¹⁴Životní cyklus a jeho náklady popisují ve své práci např. [65] nebo [61]



Obr. 8.5: Průběh ceny termického uhlí na světových trzích za poslední 3 roky



Obr. 8.6: Průběh ceny zemního plynu USA za poslední 3 roky

8.7 Hodnocení investice dle LRMC

Metoda LRMC¹⁵ je vyvíjena na katedře ekonomiky Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze. Tato metoda je popsána například v [70] a vychází z prací ruských energetiků (Melentěv) v šedesátých a sedmdesátých letech (zamykajuschije zatraty). Ve zkratce se zabývá měrnými náklady tak zvaných závěrných elektráren¹⁶. Tato metoda je velice zajímavá pro určení ceny elektřiny, kterou lze vyčíslit pro různé zdroje energie. Jak uvádí Vítek [70], aktuální cena elektřiny na trhu není pro hodnocení dlouhodobých investic ideální. Proto je lepší ocenit zařízení dle LRMC. Předpokladem pro použití této metody je znalost technicko-ekonomických ukazatelů závěrných zdrojů včetně dopravních cest.

Její obecné vyjádření je [70]:

$$LRMC = k_{zpj}k_m\{k_{vs}k_r n_{iE}[a(r, T_{zE}) + p_{psE}] + n_{iS}[a(r, T_{zS}) + p_{psS}]\} + T_m k_{zwj} n_{wE} \quad (\text{Kč.kW}^{-1} \cdot \text{r}^{-1}) \quad (8.11)$$

kde

$k_{zpj} \dots$ je koeficient ztrát výkonu na vedeních až do j -té napěťové hladině,

$k_m \dots$ je koeficient účasti maxima nového odběratele na maximu zatížení ES,

$k_{vs} \dots$ je koeficient vlastní spotřeby závěrné elektrárny,

¹⁵LRMC – Stablní dlouhodobý marginální náklad na elektřinu

¹⁶Závěrná elektrárna je taková, která může bez významnějších omezení nahradit dosluhující zdroje a může krýt zvyšující se zatížení

$k_r \dots$ je koeficient zálohy výkonu v závěrných elektrárnách,
 $n_{iE} \dots$ jsou měrné investiční výdaje na výstavbu závěrných elektráren (Kč.kW^{-1}),
 $(r, T_{zE}) \dots$ je poměrná anuita v závislosti na diskontní míře r a době životnosti závěrné elektrárny
 T_{zE} respektive sítě T_{zS} (r),
 $a(r, T_z) = \frac{r(1+r)^{T_z}}{(1+r)^{T_z}-1}$,
 $p_{psE} \dots$ jsou poměrné provozní roční stálé náklady závěrných elektráren,
 $n_{iS} \dots$ jsou měrné investiční výdaje na výstavbu závěrných sítí pro dopravu elektřiny k novému
odběrateli (Kč.kW^{-1}),
 $p_{psS} \dots$ jsou poměrné roční stálé náklady závěrných sítí,
 $T_m \dots$ je roční doba využití maxima nového odběratele (h.r^{-1}),
 $k_{zwj} \dots$ je koeficient ztrát energie ve vedeních ES až do j -té napěťové hladiny,
 $n_{wE} \dots$ jsou poměrné měrné náklady výroby elektřiny v závěrné elektrárně (Kč.kW^{-1}).

Jak uvádí zdroj [70], vzorec LRMC počítá s jediným typem závěrné elektrárny a nezohledňuje případné nahrazení starých zdrojů těmito novými, které mají nižší náklady. Dalším předpokladem je, že se počítá pouze se zálohou v době ročního maxima.

Tato metoda je velmi vhodná pro akumulční systémy, protože je lze považovat za určitý typ závěrného zdroje. Pokud budeme předpokládat, že lze někdy nahradit stávající konvenční zdroje elektřiny ekologickými, je nutné spočítat jejich náklady.

Při pilotním výpočtu je uvedeno, že FVE bude dodávat elektřinu v době od 9.00 hod do 13.00 hod, tedy hodiny. Přitom bude při nejhorším dnu dodávat pouze 5 % středního dodávaného výkonu a v době špičky bude minimální výkon na úrovni 11 % z maxima.

LRMC_{FVE} vychází z investičních výdajů na kWp ve výši 20000 Kč.kWp⁻¹ (podle typu panelu mohou být náklady až 35000 Kč.kWp⁻¹) a poměrných provozních stálých ročních nákladů na opravu a údržbu ve výši jednoho procenta z investičních výdajů, dále z ročních stálých nákladů na jeden 1 kW ve výši 2 291 Kč.kW⁻¹.r⁻¹. 1 727 Kč.kW⁻¹.r⁻¹ je částka na sítě z 0. napěťové hladiny (na prahu systémových elektráren, tedy na začátku 400 kV vedení) až do 5. napěťové hladiny, což je konec vedení 22 kV, kde jsou připojeny polní FVE.

Výpočet je založen na faktu, že nové PVE jako akumulátory budou připojeny na 0. napěťovou hladinu, tzn. na začátek vedení 400 kV, a proto je potřeba zvýšit přenosovou schopnost mezi 0. a 5. napěťovou hladinou pro nové polní FVE. Proto tam uvažují s těmi 1 727 Kč.kW⁻¹.r⁻¹.

Jak zjistil Vítek [70], jsou LRMC u FVE jsou na úrovni 1488 Kč.kW⁻¹.r⁻¹ za výše uvedených předpokladů.

Se zahrnutím akumulace je hodnota LRMC rovna 4201 Kč.kW⁻¹.r⁻¹. Hodnota je vyšší, protože se počítá s akumulací rovnou jednodenní výrobě elektřiny. Dále střední výkon se tím zvýší na hodnotu blízkou 20 % a soustředěním dodávky do 4 hodin, tedy 40 % z maxima minimálního špičkového výkonu.

Střešní FVE jsou na tom o třídu lépe, doplněny o akumulátory elektrické energie je můžeme považovat (jako komplet) za klasický špičkový zdroj. Nepotřebujeme žádná nová vedení, vše se odehraje v rámci nn hladiny s rizikem malého přetoku do vn. Nicméně, vzhledem k tomu, že akumulátory jsou finančně nákladné, tak se stále ještě nevyplatí.

Je patrné, že výrobní náklady jsou s akumulací vyšší, nicméně se započtením životnosti akumulátorů se může tato kombinace dlouhodobě přesto vyplatit. Je tedy nutné volit typ akumulátoru, jeho cenu a životnost, což může být považováno za další směr výzkumu.

8.8 Vyjádření stochastického průběhu a hodnota akumulace prostřednictvím investiční matematiky

Tam, kde se v reálné situaci objevují náhodné (stochastické) veličiny (což v případech obnovitelných zdrojů platí) se vyplatí uvažovat v intencích ocenění právě tímto způsobem. Při těchto typech úloh se uplatní stochastické programování. Můžeme definovat několik stupňů náhodného programování:

- modelování pomocí lineárních modelů,
- modelů s proměnlivými režimy,
- modelování za využití poznatků volatility a jejího chování,
- nebo lineární model s vícerozměrnými stacionárními časovými řadami popřípadě nestacionárními řadami.

Každý z výše popsanych jevů lze nahradit modely, např. ARIMA, ARFIMA, VARMA aj.

Kapitola 9

Závěr

9.1 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. Dle mínění [A8] nikdy nedosáhne potenciálu, který se této metodě připisuje. 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 [5], 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 akumulací 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 popsány 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 akumulací 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 širší a komplikovanost situace. Pro malé aplikace je zpracováno dostatek podobných typických řešení (např. [40]). Tyto aplikační poznatky nelze přenést do sítí 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 akumulací prostředky pro zdroje se stochastickou výrobou jsou nutným doplňkem či podmínkou pro připojení do sítě.

9.2 Závěr z předložených aspektů a podmínek použití akumulacích prostředků v sítích

Aspekty a podmínky nasazení akumulacích 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 přípojovacími 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 akumulačních systémů stále ještě nepříliš rozšířené, jak z důvodu legislativních, ekonomických a zejména technických.

Ad 2) Legislativa, zejména přípojovací 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. Modelování a chování těchto sítí je uvedeno v kapitole 6.5. 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.

9.3 Doporučení k nasazení zásobníků elektrické energie

Předchozí kapitoly se zaměřovaly na aspekty jednotlivých druhů akumulačních 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.

9.3.1 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 (plně najetí 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.).

9.4 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.

9.4.1 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 hle-

diska dlouhodobého provozu a rychlosti změn režimu nabíjení-vybíjení splňují hlavní kritérium pro začlenění do elektrizační soustavy.

9.4.2 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.

9.4.3 Návrh matematického modelu

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

9.4.4 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).

9.4.5 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.

9.5 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 [A31]),
- 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 [A30, A32]), byl vytvořen model vanadového akumulátoru, který v dostupné české literatuře nebyl popsán,
- byly vytvořeny dílní modely – větrná elektrárna, akumulátor, zátěž a ekonomický model ocenění.

Téma práce je multioborové. Studium elektrofyzikálních vlastností akumulčních 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 (viz např. příloha D).

Modelování jednotlivých akumulčních 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 použitých typů zásobníků.

Přínosem práce je zejména definování nových oblastí využití akumulčních 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 pojmout 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.

9.6 Pokračování výzkumu

Pokračování výzkumu se zaměří na finální evaluaci modelu na skutečném vanadovém akumulátoru za použití moderní hybridní čtyř-kvadrantové nabíjecí/vybíjecí stanice s následným začleněním obnovitelných zdrojů do soustavy s akumulátorem.

Výzkum se také zaměří na ocenění elektrické energie při využití lokálních akumulátorů zapojených do distribuční soustavy. Tento bod je velmi důležitý pro další rozvoj místních obnovitelných zdrojů, včetně koncepce Smart Grid. Dá se konstatovat, že klasické ekonomické metody založené na NPV, IRR nejsou vhodné.

Akumulací elektrické energie je nutné se zabývat také z hlediska ideálního výkonného rozložení zatížení na vedení. V této oblasti je prostor pro kompletní analýzu implementace malých akumulátorů elektrické energie a snížení produkce emisních plynů (odstraněním například teplých záloh).

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] BELOV, A.: *Provoz a údržba olověných akumulátorů*, ročník 1. SNTL, Praha, 1958.
- [4] 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>>
- [5] 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>>
- [6] BOTTE, G. G.; SUBRAMANIAN, V. R.; WHITE, R. E.: Mathematical modeling of secondary lithium batteries. *Electrochimica Acta*, ročník 45, č. 15–16, 2000: s. 2595 – 2609, ISSN 0013-4686, doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S0013-4686\(00\)00340-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0013-4686(00)00340-6).
URL <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013468600003406>>
- [7] BRDIČKA, R.; DVOŘÁK, J.: *Základy fyzikální chemie*. Academia, 1977.
- [8] 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.
- [9] CHEMIŠINEC, I.; MARVAN, M.; NEČESANÝ, J.; aj.: *Obchod s elektřinou*. Conte, 2010, ISBN 978-80-254-6695-7.
- [10] CROTOGINO, F.; MOHMEYER, K.-u.; SCHARF, R.: Huntorf CAES : More than 20 Years of Successful Operation. *North*, ročník 1, č. April, Apr 2001, datum citace: 4.4.2010.
URL <http://www.uni-saarland.de/fak7/fze/AKE_{ }Archiv/AKE2003H/AKE2003H_{ }Vortraege/AKE2003H03c_{ }CrotoGINO_{ }ea_{ }HuntorfCAES_{ }CompressedAirEnergyStorage.pdf>
- [11] DOYLE, M.; NEWMAN, J.: The use of mathematical modeling in the design of lithium/polymer battery systems. *Electrochimica Acta*, ročník 40, č. 13–14, 1995: s. 2191 – 2196, ISSN 0013-4686, doi:[http://dx.doi.org/10.1016/0013-4686\(95\)00162-8](http://dx.doi.org/10.1016/0013-4686(95)00162-8),

- <ce:title>International symposium on polymer electrolytes</ce:title>.
URL <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013468695001628>>
- [12] DROSTE-FRANKE, B.; PAAL, B.; REHTANZ, C.; aj.: *Balancing Renewable Electricity: Energy Storage, Demand Side Management, and Network Extension from an Interdisciplinary Perspective*. Ethics of Science and Technology Assessment, Springer, 2012, ISBN 9783642251566.
- [13] ECKROAD, S.; GYUK, I.: EPRI-DOE handbook of energy storage for transmission & distribution applications. *Electric Power Research Institute, Inc*, 2003, 1001834.
URL <<http://www.sandia.gov/ess/publications/ESHB/S001001834/S0020reduced/S0020size.pdf>>
- [14] EGÚ; Brno: Připojování OZE do ES. *Energetika*, ročník 60, duben 2010: s. 179 – 194.
- [15] ELECTRICITY STORAGE ASSOCIATION: Technology Comparison. červen 2011.
URL <http://www.electricitystorage.org/technology/storage_technologies/technology_comparison>
- [16] ERÚ: Výroba elektřiny za prosinec 2012 - podrobně [GWh]. Online, 2013, datum citace: 26.6.2013, URL <http://www.eru.cz/user_data/files/statistika_elektro/mesicni_zpravy/2012/prosinec/page11.htm>.
- [17] EYER, J.: Electric utility transmission and distribution upgrade deferral benefits from modular electricity storage. *Sandia National Laboratories, Albuquerque*, 2009.
- [18] EYER, J.; COREY, G.: Energy storage for the electricity grid: Benefits and market potential assessment guide. *Sandia National Laboratories Report*, 2010: str. 232, doi: SAND2010-0815, sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico, 2010.
- [19] FRITZSON, P.: *Principles of Object-Oriented Modeling and Simulation with Modelica 2.1*. John Wiley & Sons, 2004, ISBN 9780471471639.
- [20] FUELCELLTODAY: Water Electrolysis & Renewable Energy Systems. Online, Květen 2013.
URL <<http://www.fuelcelltoday.com/analysis/surveys/2013/water-electrolysis-renewable-energy-systems>>
- [21] GATZEN, C.: *The Economics of Power Storage*. Oldenbourg Industrieverlag, München., 2008, 254 s., iISBN 978-3-8356-3138-0.
- [22] GEOTHERMAL RESOURCES COUNCIL: What is Geothermal? Datum citace 15.3.2010.
URL <<http://geothermal.org/what.html>> [18]<http://geothermal.org/what.html>
- [23] GRAZZINI, G.; MILAZZO, A.: Thermodynamic analysis of CAES/TES systems for renewable energy plants. *Renewable Energy*, ročník 33, č. 9, Zář 2008: s. 1998–2006, ISSN 09601481, doi:10.1016/j.renene.2007.12.003.
URL <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960148107003849>>
- [24] GREGOR, J.; UHER, J.; RADIL, L.: Nové možnosti akumulace elektrické energie. In *In Proceedings of the 9th International Scientific Conference EPE 2008*, editace J. Drápela; J. Macháček, Vysoké učení technické v Brně, 2008, ISBN 978-80-214-3650-3, s. 67 – 71.

- [25] GRIDWISE ARCHITECTURE COUNCIL: The Modern Grid Initiative. *Pacific Northwest National Laboratory*, 2008.
- [26] HAMAJIMA, T.; HANAI, S.: Test results of the 100 kWh SMES model coil - AC loss performance. *Cryogenics*, ročník 39, November 1999: s. 947 – 953, ISSN 0011-2275, doi: 10.1016/S0011-2275(99)00127-7.
- [27] HIGHVIEW POWER STORAGE: Power Highview Storage - Large Scale Energy Storage. electronic, march 2012, citace: 20.5.2011.
URL <http://www.highview-power.com/wordpress/?page_id=1320f>
- [28] HNUTÍ DUHA: Chytrá energie. Online, datum citace: 28.4.2010.
URL <http://chytraenergie.info/wp-content/uploads/2010/04/chytra_energie.pdf>
- [29] HNUTÍ DUHA: Nemecko-elektrina. Online, srpen 2013.
URL <http://www.velkavyzva.cz/content/files/nemecko_elektrina.jpg>
- [30] HORÁČEK, P.: Power Balance Control in Electrical Grids. *Učební texty k semináři*, 2010: str. 44.
URL <<http://www.crr.vutbr.cz>>
- [31] HUŠEK, J.: *Pumped storage hydro plant*. SNTL Praha, 1963, ISBN 04-243-63, 10 – 30 s.
- [32] IKEDA, S.; KURIYAMA, N.; KIYOBAYASHI, T.: Simultaneous determination of ammonia emission and hydrogen capacity variation during the cyclic testing for LiNH₂–LiH hydrogen storage system. *International Journal of Hydrogen Energy*, ročník 33, č. 21, 2008: s. 6201 – 6204, ISSN 0360-3199, doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.08.003>.
URL <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319908009774>>
- [33] JANEKOVÁ, J.; JANEK, J.; PARTILA, J.: Investícia ako faktro zvyšovania hodnoty podniku. 10 2007, citace: 18.2.2013.
URL <www.sjf.tuke.sk/transfereinovaci/pages/archiv/transfer/10-2007/pdf/200-203.pdf>
- [34] JIRSA, M.: Vysokoteplotní supravodiče a akumulace elektrické energie. červen 2010, cyklus přednášek 2010 EGÚ Praha, seminář č. 6.
- [35] KENISARIN, M.; MAHKAMOV, K.: Solar energy storage using phase change materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, ročník 11, č. 9, 2007: s. 1913 – 1965, ISSN 1364-0321, doi:10.1016/j.rser.2006.05.005.
URL <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032106000633>>
- [36] KOFRÁNEK, J.: *Tvorba lékařských simulátorů*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, 2009, habilitační práce.
- [37] KOFRÁNEK, J.; HOZMAN, J.: *Pacientské simulátory*, ročník 1. Creative Connections, s.r.o, 2013, ISBN 978-80-904326-6-6.
- [38] KOLCUN, M.; GRIGER, V.; GRAMBLIČKA, M.; aj.: *Riadenie prevádzky elektrizačnej sústavy*. Mercury-Smékal, 2001, ISBN 80-89061-57-5.

- [39] KORNIÁK, 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.
- [40] KOTĚŠOVEC, J.: *Studie autonomního napájení rodinného domu elektřinou ze střešních fotovoltaických panelů*. Diplomová práce, Západočeská univerzita v Plzni, 2012.
- [41] KRBAL, M.: Výroba elektrické energie větrnými elektrárnami a možnosti její akumulace. 2007, [online].
- [42] KUBÍN, M.: Problematika větrných a hybridních elektráren - I. *Energetika*, ročník 59, červen 2009: s. 249 – 269, ISSN 0375-8842.
- [43] KUBÍN, M.: Problematika větrných a hybridních elektráren - II. *Energetika*, ročník 60, červenec 2009: s. 300 – 314, ISSN 0375-8842.
- [44] LENCZ, I.: Inteligentní sítě - otázky, postřehy. *Energetika*, ročník 62, č. 10, říjen 2012: s. 519 – 529.
- [45] LEÓN, C. P. D.; FRÍAS-FERRER, A.; GONZÁLEZ-GARCÍA, J.; aj.: Redox flow cells for energy conversion. *Journal of Power Sources*, ročník 160, č. 1, 2006: s. 716 – 732, ISSN 0378-7753, doi:10.1016/j.jpowsour.2006.02.095.
URL <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037877530600437X>>
- [46] LINDEN, D.; REDDY, T.: *Handbook of batteries*. McGraw-Hill handbooks, McGraw-Hill, 2002, ISBN 9780071359788.
- [47] MARKVART, T.: Dimenzování autonomních fotovoltaických systémů. *TZB-Info.cz*, červen 2011: str. 3, datum citace: 23.4.2013, URL <<http://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/7574-dimenzovani-autonomnich-fotovoltaiicky-systemu>>.
- [48] MARKVART, T.: Dimenzování hybridních systémů fotovoltaika-vítr, zjednodušený model pro předběžné rozhodování. *TZB-Info.cz*, červen 2012: str. 4, datum citace: 19.4.2013, URL <<http://oze.tzb-info.cz/8747-dimenzovani-hybridnich-systemu-fotovoltaika-vitr>>.
- [49] McEVOY, A.; MARKVART, T.; CASTANER, L.: *Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications*. Academic Press, Elsevier Science, 2011, ISBN 9780123859341.
URL <<http://books.google.cz/books?id=7HAYuePR0JsC>>
- [50] MEARS, D.; GOTSHALL, H.: *EPRI-DOE Handbook of Energy. Storage for Transmission & Distribution Applications*. EPRI, Palo Alto, CA, and the U.S. Department of Energy, Washington, DC, December 2003, report, 1001834.
URL <www.sandia.gov/ess/.../ESHB%201001834%20reduced%20size.pdf>
- [51] MÁČE, M.: *Finanční analýza investičních projektů: praktické příklady a použití*. Finance (Grada), Grada, 2006, ISBN 9788024715575.
- [52] NGK, c. L.: NAs Battery. Online, 2011.
URL <http://www.ngk.co.jp/english/products/power/nas/image/img_nas_installation_01.jpg>

- [53] OTE, a.: Zpráva o očekávané rovnováze 2012. Online, 2012, dostupné na <<http://www.ote-cr.cz/o-spolecnosti/soubory-vyrocní-zprava-ote/zprava-o-ocekavane-rovnovaze-2012.pdf>>.
- [54] PEARSON, R.; EISAMAN, M.; TURNER, J.; aj.: Energy Storage via Carbon-Neutral Fuels Made From CO₂, Water, and Renewable Energy. *Proceedings of the IEEE*, ročník 100, č. 2, feb. 2012: s. 440–460, ISSN 0018-9219, doi:10.1109/JPROC.2011.2168369.
- [55] RADIL, L.: *Model akumulace velkých objemů energie [online]*. Diplomová práce, Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií., Brno :, 2007.
- [56] RASTLER, D.: *Electricity Energy Storage Technology Options: A White Paper Primer on Applications, Costs and Benefits*. Electric Power Research Institute, 2010.
URL <<http://www.epri.com/abstracts/Pages/ProductAbstract.aspx?ProductId=000000000001020676>>
- [57] RASTLER, D.: Electricity Energy Storage Technology Options: System Cost Benchmarking. In *IPHE Workshop "Hydrogen- A competitive Energy Storage Medium for large scale integration of renewable electricity"*, Casa Palacio de Guardiola, Seville, Spain, November 2012.
URL <http://www.iphe.net/docs/Events/Seville_11-12/Workshop/Presentations/Session%201/1.4_IPHE%20workshop_Rastler.pdf>
- [58] RIES, G.; NEUMUELLER, H.-W.: Comparison of energy storage in flywheels and SMES. *Physica C: Superconductivity*, ročník 36, Part 2, č. 0, 2001: s. 1306–1310, ISSN 0921-4534, doi:10.1016/S0921-4534(01)00484-1.
URL <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921453401004841>>
- [59] ROUBAL, J.: Smart Grids – odpověď na otázky budoucího vývoje elektroenergetiky – I část. *Energetika*, ročník 60, č. 2, 2010: s. 105–108.
- [60] SAVINELL, F. R.: Flow Batteries a Historical Perspective. In *DOE Flow Battery Workshop*, Březen 2012, str. 27, datum citace: 23.4.2013.
URL <http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/flowcells2012_savinell.pdf>
- [61] SCHOENUNG, S. M.; HASSENZAHN, W. V.: Long-vs. Short-Term Energy Storage Technologies Analysis. A Life-Cycle Cost Study. A Study for the DOE Energy Storage Systems Program. *Sandia National Laboratories*, 2003.
URL <http://infoserve.sandia.gov/sand_doc/2003/032783.pdf>
- [62] SCROSATI, B.; GARCHE, J.: Lithium batteries: Status, prospects and future. *Journal of Power Sources*, ročník 195, č. 9, 2010: s. 2419–2430.
- [63] SHIVELY, D.; GARDNER, J.; HAYNES, T.; aj.: Energy Storage Methods for Renewable Energy Integration and Grid Support. In *2008 IEEE Energy 2030 Conference*, November, IEEE, Listopad 2008, ISBN 978-1-4244-2850-2, s. 1–6, doi: 10.1109/ENERGY.2008.4781002.
URL <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4781002>>
- [64] SKYLLAS-KAZACOS, M.; GROSSMITH, F.: Efficient vanadium redox flow cell. *Journal of the Electrochemical Society*, ročník 134, č. 12, 1987: s. 2950–2953.

- [65] STEWARD, D.; SAUR, G.; PENEV, M.; aj.: Lifecycle cost analysis of hydrogen versus other technologies for electrical energy storage. *National Renewable Energy Laboratory, Golden (CO)(2009 Nov) Report No.: NREL/TP56046719. Contract No.: DEAC3608G028308*, 2009.
- [66] TER-GAZARIAN, A.: *Energy Storage for Power Systems (2nd Edition)*. Institution of Engineering and Technology., 2011, 1-289 s., dostupné online: http://www.knovel.com/web/portal/browse/display?_EXT_KNOVEL_DISPLAY_bookid=4661&VerticalID=0.
- [67] TER-GAZARIAN, A.; of Electrical Engineers, I.: *Energy Storage for Power Systems*. Iee Energy Series, Peter Peregrinus, 1994, ISBN 9780863412646.
URL <<http://books.google.cz/books?id=5VMotgCfJmAC>>
- [68] THELEN, R.; GATTOZZI, A.; WARDELL, D.; aj.: A 2-MW Motor And ARCP Drive for High-Speed Flywheel. In *Applied Power Electronics Conference, APEC 2007 - Twenty Second Annual IEEE*, 25 2007-march 1 2007, ISSN 1048-2334, s. 1690–1694, doi:10.1109/APEX.2007.357746.
- [69] 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.
- [70] VÍTEK, M.: Nahradíme jádro větrem nebo sluncem? *Energetika*, ročník 63, č. 5, 2013: s. 295–301, iISSN 0375-8842.
- [71] WAGNER, R.: Large lead/acid batteries for frequency regulation, load levelling and solar power applications. *Journal of Power Sources*, ročník 67, č. 1, 1997: s. 163 – 172, ISSN 0378-7753, doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7753\(97\)02509-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7753(97)02509-3), <ce:title>Proceedings of the Fifth European Lead Battery Conference</ce:title>.
URL <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775397025093>>
- [72] 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>>
- [73] WOLFRAM RESEARCH: *User Guide – WolframSystemModeler*. první vydání, 2012.
- [74] ZHANG, T.: *The Economic Benefits of Battery Energy Storage System in Electric Distribution System*. Diplomová práce, WORCESTER POLYTECHNIC INSTITUTE, April 2013, online.
- [75] ZHONG, Y.; ZHANG, J.; LI, G.; aj.: Research on Energy Efficiency of Supercapacitor Energy Storage System. In *2006 International Conference on Power System Technology, IEEE*, Říjen 2006, ISBN 1-4244-0110-0, s. 1–4, doi:10.1109/ICPST.2006.321547.
URL <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4115877>>

Autorova publikační činnost

- [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] GREGOR, J.; UHER, J.; RADIL, L. *Nové možnosti akumulace velkých objemů elektrické energie*. In Proceedings of the 9th International Scientific Conference EPE 2008. 2008. p. 67 - 71. ISBN 978-80-214-3650-3.
- [A3] MASTNÝ, P.; RADIL, L. *Trendy vývoje alternativních zdrojů energie a jejich začlenění do energetických systémů*. In Perspektivy elektroniky 2009. Rožnov pod Radhoštěm, SŠ Rožnov pod Radhoštěm. 2009. p. 59 - 65. ISBN 978-80-254-4052-0.
- [A4] RADIL, L.; MASTNÝ, P. *The electric energy storage*. In Proceedings of the 15th Conference Student EEICT 2009 Volume 1. Brno, NOV PRESS s.r.o. 2009. p. 102 - 106. ISBN 978-80-214-3870-5.
- [A5] 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.
- [A6] 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.
- [A7] RADIL, L. *Vodík - nosič energie, akumulární schopnost a výroba ve velkých objemech*. In Sborník příspěvků konference KRÁLÍKY 2009. Brno, VUT v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. 2009. p. 229 - 232. ISBN 978-80-214-3938-2.
- [A8] RADIL, L. *Hydrogen economy? Uncertain future*. In Proceedings of the 16th Conference Student EEICT 2010 Volume 4. Brno, NOV PRESS s.r.o. 2010. p. 162 - 165. ISBN 978-80-214-4079-1.

- [A9] 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.
- [A10] 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.
- [A11] RADIL, L.; MASTNÝ, P. *Accumulation Energy Devices and RES*. Volume of Abstracts of the 1st International Scientific Conference OZE 2010. Bratislava, Slovak University of Technology in Bratislava. 2010. p. 27 - 28. ISBN 978-80-89402-21-2.
- [A12] RADIL, L.; MASTNÝ, P. *OZE a zařízení energetické akumulace*. In Proceedings of the 1st International Scientific Conference OZE 2010. 1. Bratislava, Slovak University of Technology in Bratislava. 2010. p. 1 - 5. ISBN 978-80-89402-24-3.
- [A13] MASTNÝ, P.; RADIL, L. *Simulation of Operating States and Characteristics of Heat Pumps*. In Selected Topics in energy, Environment, Sustainable Development and Landscaping. 1. Politehnica University of Timisoara, Romania, WSEAS Press. 2010. p. 182 - 187. ISBN 978-960-474-237-0.
- [A14] MASTNÝ, P.; MASTNÁ, Z.; RADIL, L. *Energy systems for moder buildings - simulation of operating states of heat pumps*. In Development, Energy, Environment, Economics. Puerto De La Cruz, Tenerife, Spain, WSEAS Press. 2010. p. 260 - 267. ISBN 978-960-474-253-0.
- [A15] RADIL, L.; MASTNÝ, P.; KYNCL, J. *A Battery Model for Small Renewable Sources*. In Proceedings of the 12th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2011. 1. Ostrava, VSB - Technical University of Ostrava. 2011. p. 1 - 4. ISBN 978-80-248-2393-5.
- [A16] 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.
- [A17] RADIL, L.; MASTNÝ, P. *Model baterie pro malé akumulční systémy*. In International Scientific Event - Power Engineering 2011. 1. Bratislava, Slovakia, Slovak University of Technology in Bratislava. 2011. p. 73 - 77. ISBN 978-80-89402-38-0.

- [A18] MASTNÝ, P.; RADIL, L.; MASTNÁ, Z. *Energetické systémy s OZE v moderní výstavbě*. In Proceedings of the 2nd International Scientific Conference Renewable Energy Sources 2011. TU Bratislava, SK, Slovak University of Technology in Bratislava. 2011. p. 1 - 5. ISBN 978-80-89402-39-7.

- [A19] 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.

- [A20] MASTNÝ, P.; MASTNÁ, Z.; RADIL, L. *Heating Systems Using RES in Modern Building Construction*. International Scientific Event - Power Engineering 2011. Bratislava, Slovakia, Slovak University of Technology in Bratislava. 2011. p. 173 - 174. ISBN 978-80-89402-38-0.

- [A21] MASTNÝ, P.; RADIL, L.; MASTNÁ, Z. *Operating Characteristics of Multivalent Systems Using Renewable Energy Sources*. INTERNATIONAL JOURNAL of ENERGY and ENVIRONMENT. 2011. 5(6). p. 745 - 752. ISSN 109-9577.

- [A22] 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.

- [A23] MASTNÝ, P.; RADIL, L.; MASTNÁ, Z. *Possibilities of PV Panels Defects Identification and Determination of its Effect on the Economy of Photovoltaic Power Plants Operation*. In Mathematical Models and Methods in Modern Science. Puerto De La Cruz, Spain, WSEAS Press. 2011. p. 233 - 238. ISBN 978-1-61804-055-8.

- [A24] RADIL, L. *Effects of Photovoltaic Power Plants in Electricity Prices for Consumers*. In Proceedings of the 18th Conference Student EEICT 2012 Volume 1. Brno. 2012. p. 202 - 206. ISBN 978-80-214-4462-1.

- [A25] RADIL, L.; BERNÁTH, F. *Netradiční metody skladování energie použitelné v praxi*. In Sborník příspěvků ze semináře: 33. Nekonenční zdroje elektrické energie. 1. Hrotovice, Česká elektrotechnická společnost. 2012. p. 97 - 99. ISBN 978-80-02-02372-2.

- [A26] MACHÁČEK, J.; RADIL, L.; KUBÍN, D. *Současný stav a potenciál využití obnovitelných zdrojů v EU*. In Proceedings of the 13th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2012. Volume 1. Brno, Brno University of Technology. 2012. p. 623 - 627. ISBN 978-80-214-4514-7.

- [A27] MACHÁČEK, J.; RADIL, L. *Využití software Mathematica nebo Matlab pro hodnocení ekonomické efektivnosti projektu v elektroenergetice*. In Proceedings of the 13th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2012. Volume 1. Brno, Brno University of Technology. 2012. p. 233 - 237. ISBN 978-80-214-4514-7.
- [A28] RADIL, L.; MASTNÝ, P.; BARTOŠÍK, T. *Analýza vývoje cenového příspěvku pro fotovoltaické a bioplynové elektrárny v České republice*. In Proceedings of the 13th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2012, Volume 1. 1. Brno, Brno University of Technology. 2012. p. 475 - 479. ISBN 978-80-214-4514-7.
- [A29] RADIL, L. *Netradiční metoda akumulace elektrické energie* Energetika. 2013. 63(2). p. 76-78. ISSN 0375-8842.
- [A30] RADIL, L.; MACHÁČEK, J.; MASTNÝ, P.; OSIČKA, A. *Wind Power Plant Model in Modelica Language*. Bratislava. 2013. (6 p.)
- [A31] 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.
- [A32] BARTOŠÍK, T.; RADIL, L.; MASTNÝ, P. *Numerical Models for Wind Power Plant Power Prediction*. In Proceedings of the 14th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2013. Ostrava, VSB – Technical University of Ostrava. 2013. p. 759 - 762. ISBN 978-80-248-2988-3.
- [A33] 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.

Rejstřík

AA-CAES, 25

akauzální, 53

baterie, 17

BrSn, 42

CAES, 25, 32

deklarativní, 53

elektronová výměna, 57

Enertrag, 20

Halogenový akumulátor, 45

Hodnocení investice dle LRMC, 114

kapacita, 16

kauzální, 53

King Island, 20

Latentní teplo, 51

Lithiové akumulátory, 42

Marquerre, 31

Metal-air akumulátor, 50

Modelica® 53

nabíjecí napětí, 18

nabíjecí proud, 18

Na-ion, 40

Ni-Cd, 36

Nikl-zinkový akumulátor, 50

Olověný akumulátor, 40

Polysulfidový Brómový akumulátor, 44

primární článek, 17

Průtokové akumulátory, 42

Přečerpávací vodní elektrárny, 33

REDOX, 26

Rokkashomura Wind Farm, 21

Ruths, 31

sekundární článek, 17

Setrvačník, 37

Superconducting magnetic energy storage, 40

Syntetický metan, 48

účinnost, 17

Utsira, 21

Vanadový redoxní akumulátor, 45

vnitřní odpor, 18

Vodíková akumulace, 34

ZEBRA akumulátor, 42

Zinko-céřiový akumulátor, 44

Zinko-vzduchový akumulátor, 50

Zkapalněný vzduch, 47

Železo-chloritý akumulátor, 44

Železo-chromitý akumulátor, 44

Curriculum Vitae

Osobní údaje Ing. Lukáš Radil
Oslavanská 218
664 11 Zbýšov
email: lukas.radil@phd.feec.vutbr.cz
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 – doteď 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
-------	--

Kapitola 10

Seznam příloh

Příloha A	Výstup z HOMERu	138
Příloha B	Výstup z PVSYS	146
Příloha C	Výstup z TRNSYS	152
Příloha D	Resumé nákladů jednotlivých technologií	154
Příloha E	Výstupy z monitorovací jednotky akumulátoru VRB	158
Příloha F	Porovnání průběhů ze zdrojů LiFePO_4 a Pb akumulátoru	164

Příloha A

Výstup z HOMER Energy

V příloze najdeme grafické výpisy z programu HOMER (NREL) a z jeho grafického rozhraní. Testován byl příklad, který je uveden v kapitole 7. Byly vybrány olověné akumulátory, přímo z databáze v programu. Jednalo se zejména o ověření funkce a výsledků. Na dalších snímcích je příklad jiné možnosti zapojení, ve které je použit vyšší výkon fotovoltaických panelů. V tomto případě jsou méně využity akumulátory v rámci SOC a je více mařena dostupná energie.

HOMER - [Project2.v] File View Inputs Outputs Window Help

Equipment to consider: Add/Remove...

Resources: AC Solar Resource, DC Other, Economics, System Control, Grid Extension, Emissions, Constraints

Warnings: Some sensitivity links are invalid.

Document: Author: Lukas Radl

Notes: Výpočet autonomního systému

Calculate

Sensitivity Results Optimization Results

Sensitivity variables:

Primary Load 1 (kWh/d) 4.81 PV Slope (deg) 0 T-105Min. Life (yr) 4 Inverter Efficiency (%) 90 Rectifier Efficiency (%) 85

Interest Rate (%) 6

Double click on a system below for simulation results.

	PV (kW)	T-105	Conv. (kW)	Initial Capital	Operating Cost (\$/yr)	Total NPC	CDE (\$/kWh)	Ren. Frac.	Bat. Li. (yr)
	8.0	8	2	\$ 9,400	117	\$ 10,896	0.486	1.00	10.0
	8.0	10	2	\$ 9,500	118	\$ 11,011	0.491	1.00	10.0
	8.0	8	4	\$ 10,400	144	\$ 12,236	0.545	1.00	10.0
	8.0	10	4	\$ 10,500	145	\$ 12,351	0.550	1.00	10.0
	8.0	8	5	\$ 10,900	157	\$ 12,906	0.575	1.00	10.0
	8.0	10	5	\$ 11,000	158	\$ 13,021	0.580	1.00	10.0
	10.0	6	2	\$ 11,300	138	\$ 13,061	0.582	1.00	9.4
	10.0	8	2	\$ 11,400	138	\$ 13,170	0.587	1.00	10.0
	10.0	10	2	\$ 11,500	140	\$ 13,286	0.592	1.00	10.0
	10.0	6	4	\$ 12,300	164	\$ 14,400	0.642	1.00	9.4
	10.0	8	4	\$ 12,400	165	\$ 14,510	0.647	1.00	10.0
	10.0	10	4	\$ 12,500	166	\$ 14,625	0.652	1.00	10.0
	10.0	6	5	\$ 12,800	178	\$ 15,070	0.671	1.00	9.4
	10.0	8	5	\$ 12,900	178	\$ 15,180	0.676	1.00	10.0
	10.0	10	5	\$ 13,000	180	\$ 15,295	0.681	1.00	10.0
	8.0	8	10	\$ 13,400	223	\$ 16,255	0.724	1.00	10.0
	8.0	10	10	\$ 13,500	224	\$ 16,370	0.729	1.00	10.0
	10.0	6	10	\$ 15,300	244	\$ 18,419	0.821	1.00	9.4
	10.0	8	10	\$ 15,400	245	\$ 18,529	0.826	1.00	10.0
	10.0	10	10	\$ 15,500	246	\$ 18,644	0.831	1.00	10.0
	20.0	4	2	\$ 21,200	245	\$ 24,333	1.084	1.00	7.0
	20.0	6	2	\$ 21,300	245	\$ 24,426	1.088	1.00	10.0
	20.0	8	2	\$ 21,400	246	\$ 24,541	1.093	1.00	10.0
	20.0	10	2	\$ 21,500	247	\$ 24,656	1.099	1.00	10.0
	20.0	4	4	\$ 22,200	272	\$ 25,673	1.144	1.00	7.0

You have changed the inputs since HOMER calculated these results

Trojan T-105 search space may be insufficient.

Converter search space may be insufficient.

Completed in 22:59.

Obr. A.1: Grafické rozhraní programu s výpisy jednotlivých kombinací

System Report - Project1

Sensitivity case

Surrette 4KS25P Minimum Life: 10 yr

Battery Initial State of Charge: 100 %

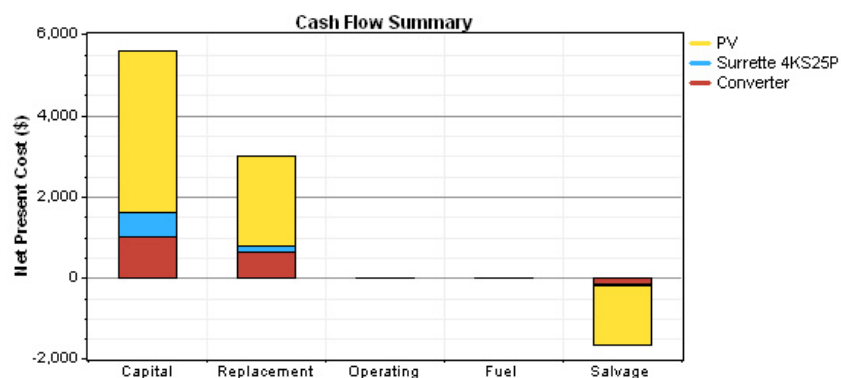
Annual Real Interest Rate: 3 %

System architecture

PV Array	4 kW
Battery	12 Surrette 4KS25P
Inverter	2 kW
Rectifier	2 kW

Cost summary

Total net present cost	\$ 6,955
Levelized cost of energy	\$ 0.228/kWh
Operating cost	\$ 77.8/yr

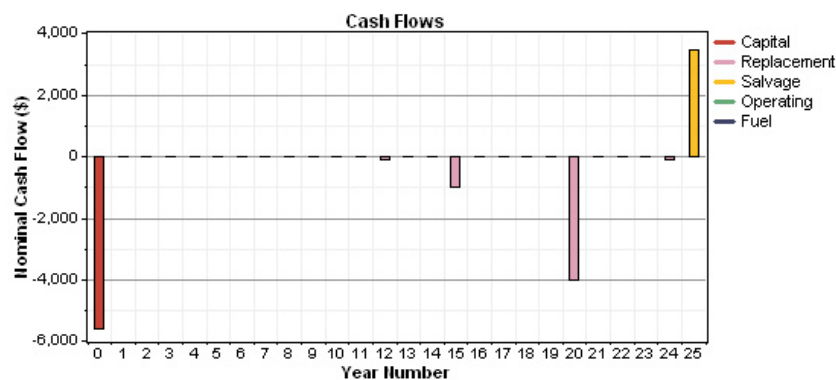


Net Present Costs

Component	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$)	Fuel (\$)	Salvage (\$)	Total (\$)
PV	4,000	2,215	0	0	-1,433	4,782
Surrette 4KS25P	600	143	0	0	-53	691
Converter	1,000	642	0	0	-159	1,483
System	5,600	3,000	0	0	-1,645	6,955

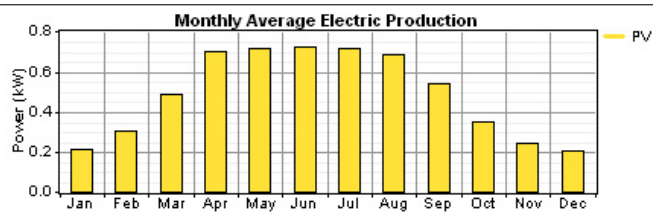
Annualized Costs

Component	Capital (\$/yr)	Replacement (\$/yr)	O&M (\$/yr)	Fuel (\$/yr)	Salvage (\$/yr)	Total (\$/yr)
PV	230	127	0	0	-82	275
Surrette 4KS25P	34	8	0	0	-3	40
Converter	57	37	0	0	-9	85
System	322	172	0	0	-94	399



Electrical

Component	Production (kWh/yr)	Fraction
PV array	4,308	100%
Total	4,308	100%



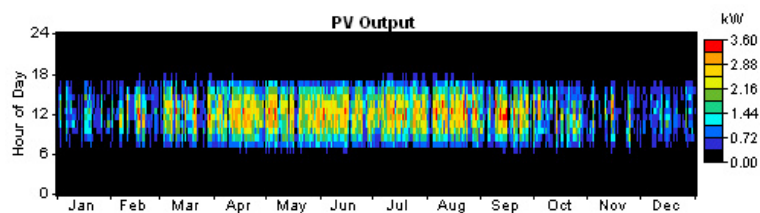
Load	Consumption	Fraction
	(kWh/yr)	
AC primary load	1,756	100%
Total	1,756	100%

Quantity	Value	Units
Excess electricity	2,245	kWh/yr
Unmet load	0.00000307	kWh/yr
Capacity shortage	0.00	kWh/yr
Renewable fraction	1.000	

PV

Quantity	Value	Units
Rated capacity	4.00	kW
Mean output	0.492	kW
Mean output	11.8	kWh/d
Capacity factor	12.3	%
Total production	4,308	kWh/yr

Quantity	Value	Units
Minimum output	0.00	kW
Maximum output	3.52	kW
PV penetration	245	%
Hours of operation	4,380	hr/yr
Levelized cost	0.0637	\$/kWh

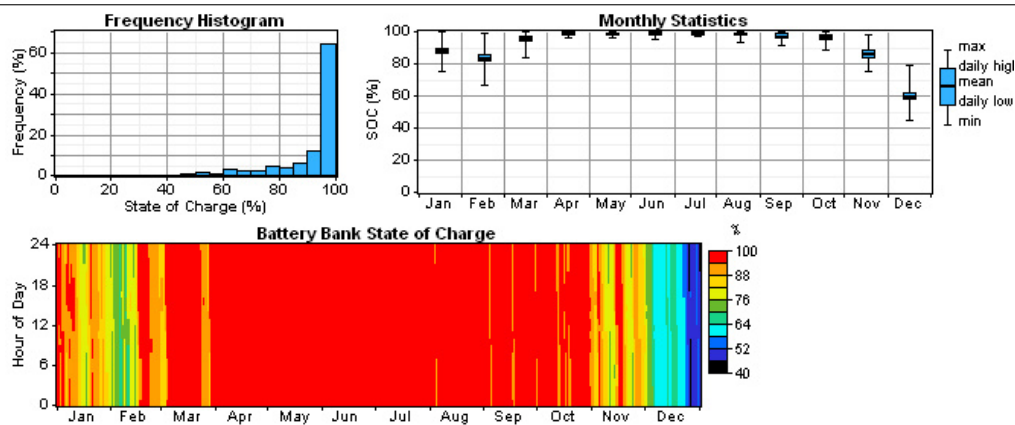


Battery

Quantity	Value
String size	6
Strings in parallel	2
Batteries	12
Bus voltage (V)	24

Quantity	Value	Units
Nominal capacity	91.2	kWh
Usable nominal capacity	54.7	kWh
Autonomy	168	hr
Lifetime throughput	126,823	kWh
Battery wear cost	0.001	\$/kWh
Average energy cost	0.000	\$/kWh

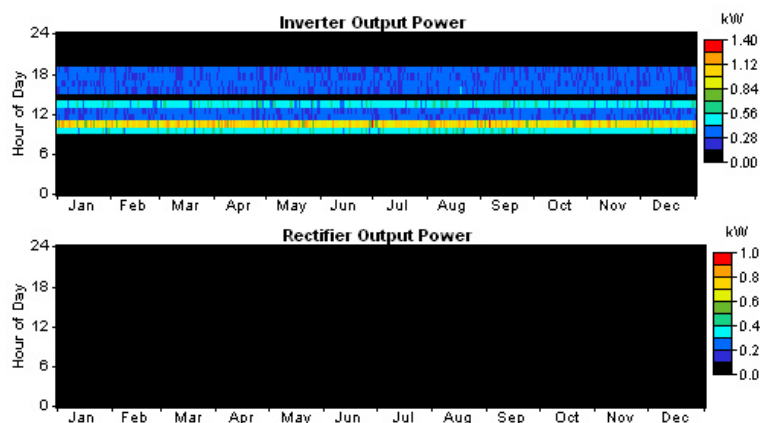
Quantity	Value	Units
Energy in	781	kWh/yr
Energy out	669	kWh/yr
Storage depletion	49.9	kWh/yr
Losses	62.3	kWh/yr
Annual throughput	748	kWh/yr
Expected life	12.0	yr



Converter

Quantity	Inverter	Rectifier	Units
Capacity	2.00	2.00	kW
Mean output	0.20	0.00	kW
Minimum output	0.03	0.00	kW
Maximum output	1.29	0.00	kW
Capacity factor	10.0	0.0	%

Quantity	Inverter	Rectifier	Units
Hours of operation	8,760	0	hrs/yr
Energy in	1,951	0	kWh/yr
Energy out	1,756	0	kWh/yr
Losses	195	0	kWh/yr



Emissions

Pollutant	Emissions (kg/yr)
Carbon dioxide	0
Carbon monoxide	0
Unburned hydrocarbons	0
Particulate matter	0
Sulfur dioxide	0
Nitrogen oxides	0

System Report - Project1

Sensitivity case

Surrette 4KS25P Minimum Life: 10 yr

Battery Initial State of Charge: 100 %

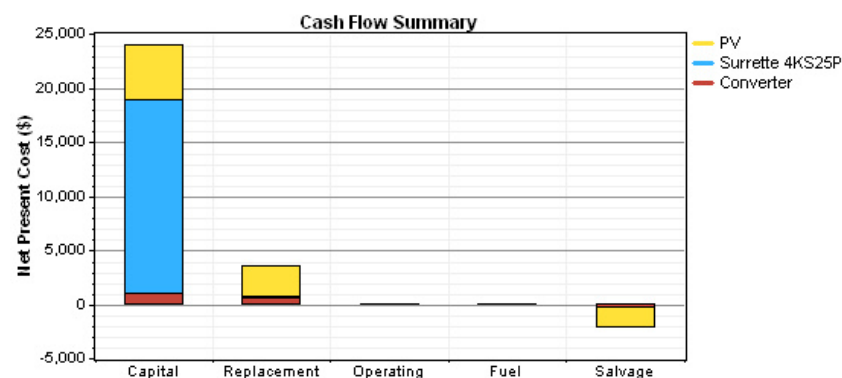
Annual Real Interest Rate: 3 %

System architecture

PV Array	5 kW
Battery	12 Surrette 4KS25P
Inverter	2 kW
Rectifier	2 kW

Cost summary

Total net present cost	\$ 25,551
Levelized cost of energy	\$ 0.836/kWh
Operating cost	\$ 89.1/yr

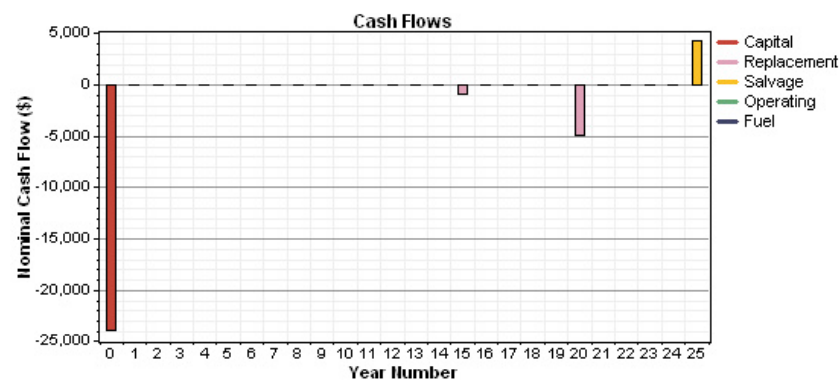


Net Present Costs

Component	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$)	Fuel (\$)	Salvage (\$)	Total (\$)
PV	5,000	2,768	0	0	-1,791	5,977
Surrette 4KS25P	18,000	143	0	0	-53	18,091
Converter	1,000	642	0	0	-159	1,483
System	24,000	3,553	0	0	-2,003	25,551

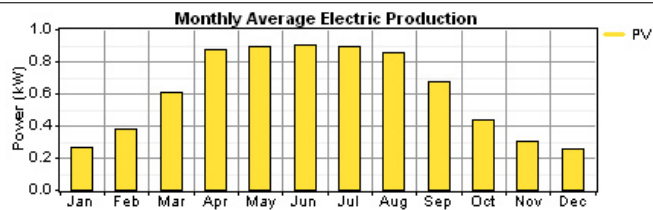
Annualized Costs

Component	Capital (\$/yr)	Replacement (\$/yr)	O&M (\$/yr)	Fuel (\$/yr)	Salvage (\$/yr)	Total (\$/yr)
PV	287	159	0	0	-103	343
Surrette 4KS25P	1,034	8	0	0	-3	1,039
Converter	57	37	0	0	-9	85
System	1,378	204	0	0	-115	1,467



Electrical

Component	Production (kWh/yr)	Fraction
PV array	5,385	100%
Total	5,385	100%



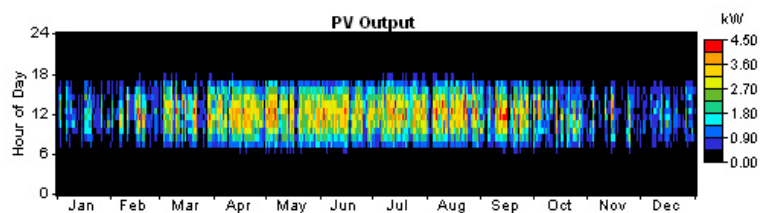
Load	Consumption	Fraction
	(kWh/yr)	
AC primary load	1,756	100%
Total	1,756	100%

Quantity	Value	Units
Excess electricity	3,289	kWh/yr
Unmet load	0.00000215	kWh/yr
Capacity shortage	0.00	kWh/yr
Renewable fraction	1.000	

PV

Quantity	Value	Units
Rated capacity	5.00	kW
Mean output	0.615	kW
Mean output	14.8	kWh/d
Capacity factor	12.3	%
Total production	5,385	kWh/yr

Quantity	Value	Units
Minimum output	0.00	kW
Maximum output	4.41	kW
PV penetration	307	%
Hours of operation	4,380	hr/yr
Levelized cost	0.0637	\$/kWh

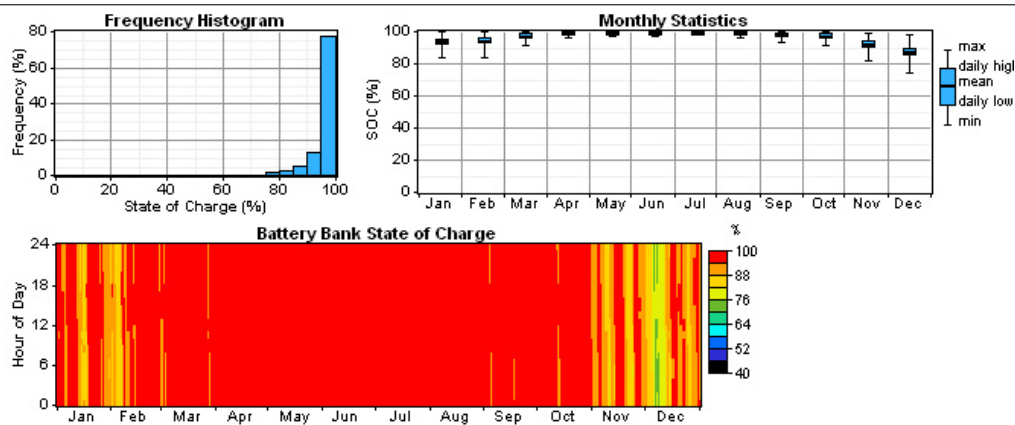


Battery

Quantity	Value
String size	6
Strings in parallel	2
Batteries	12
Bus voltage (V)	24

Quantity	Value	Units
Nominal capacity	91.2	kWh
Usable nominal capacity	54.7	kWh
Autonomy	168	hr
Lifetime throughput	126,823	kWh
Battery wear cost	0.001	\$/kWh
Average energy cost	0.000	\$/kWh

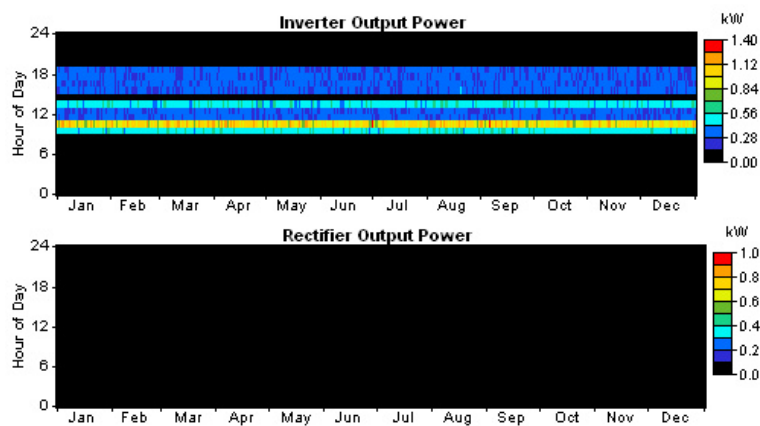
Quantity	Value	Units
Energy in	760	kWh/yr
Energy out	615	kWh/yr
Storage depletion	8.35	kWh/yr
Losses	137	kWh/yr
Annual throughput	688	kWh/yr
Expected life	12.0	yr



Converter

Quantity	Inverter	Rectifier	Units
Capacity	2.00	2.00	kW
Mean output	0.20	0.00	kW
Minimum output	0.03	0.00	kW
Maximum output	1.29	0.00	kW
Capacity factor	10.0	0.0	%

Quantity	Inverter	Rectifier	Units
Hours of operation	8,760	0	hrs/yr
Energy in	1,951	0	kWh/yr
Energy out	1,756	0	kWh/yr
Losses	195	0	kWh/yr



Emissions

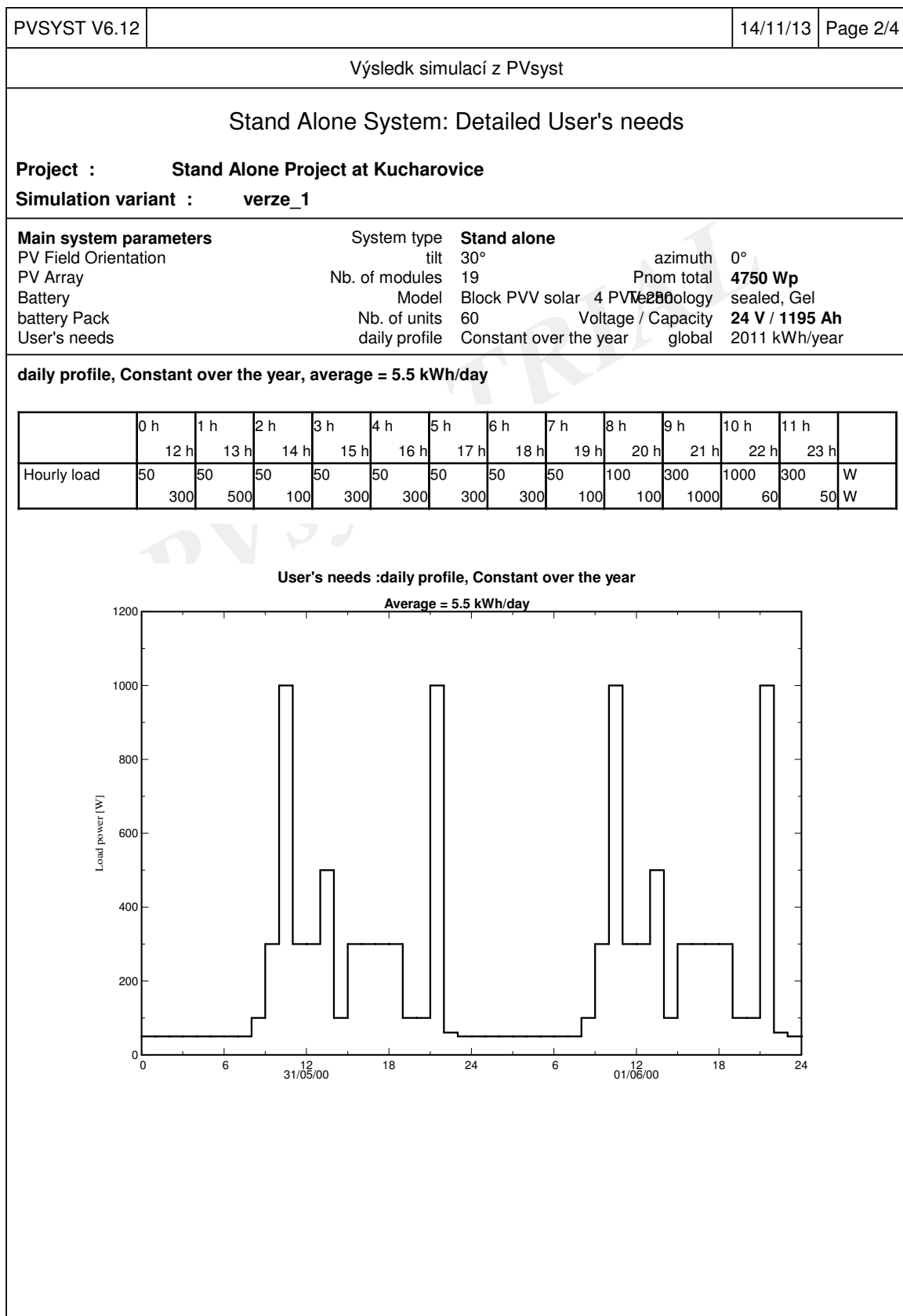
Pollutant	Emissions (kg/yr)
Carbon dioxide	0
Carbon monoxide	0
Unburned hydrocarbons	0
Particulate matter	0
Sulfur dioxide	0
Nitrogen oxides	0

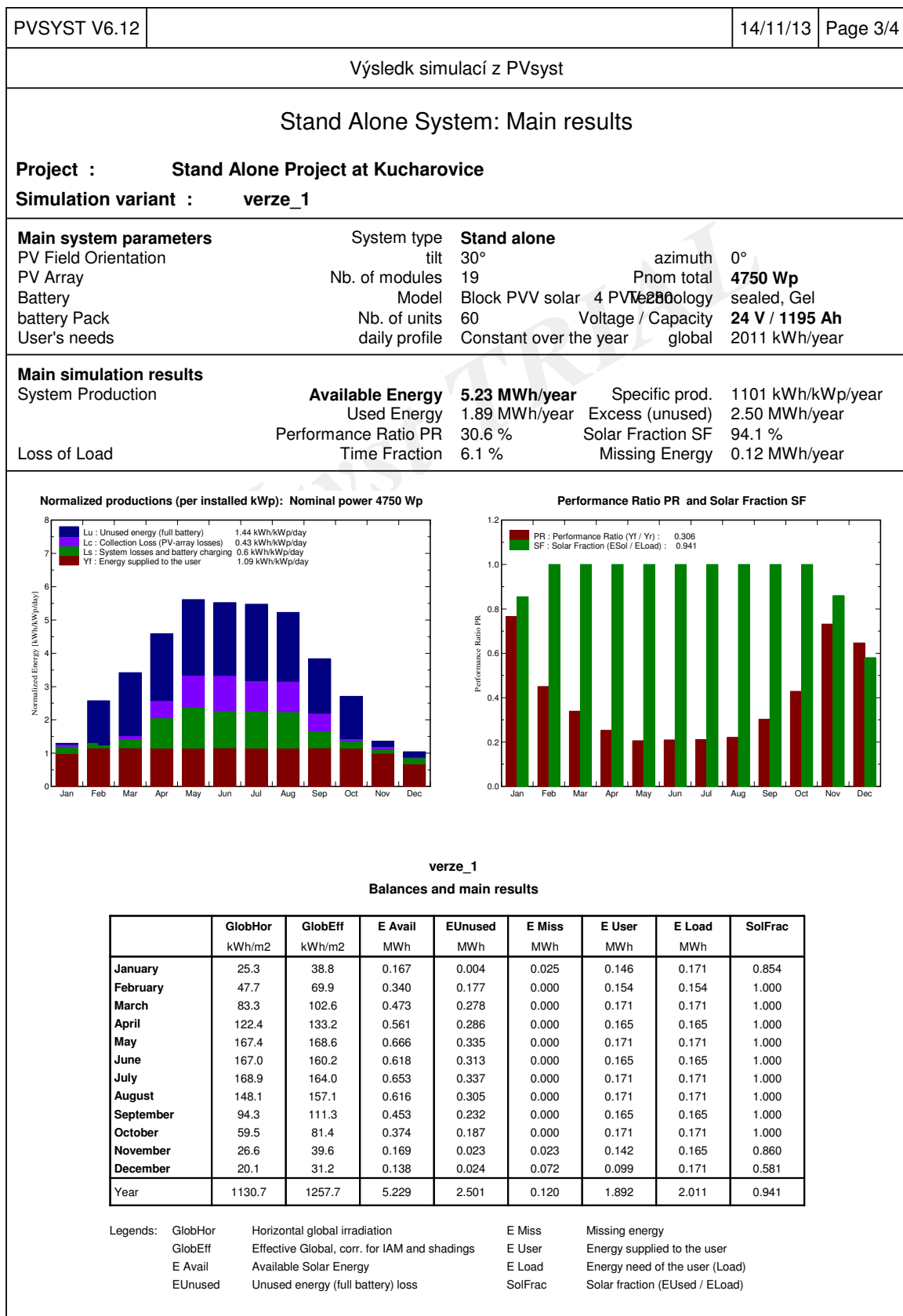
Příloha B

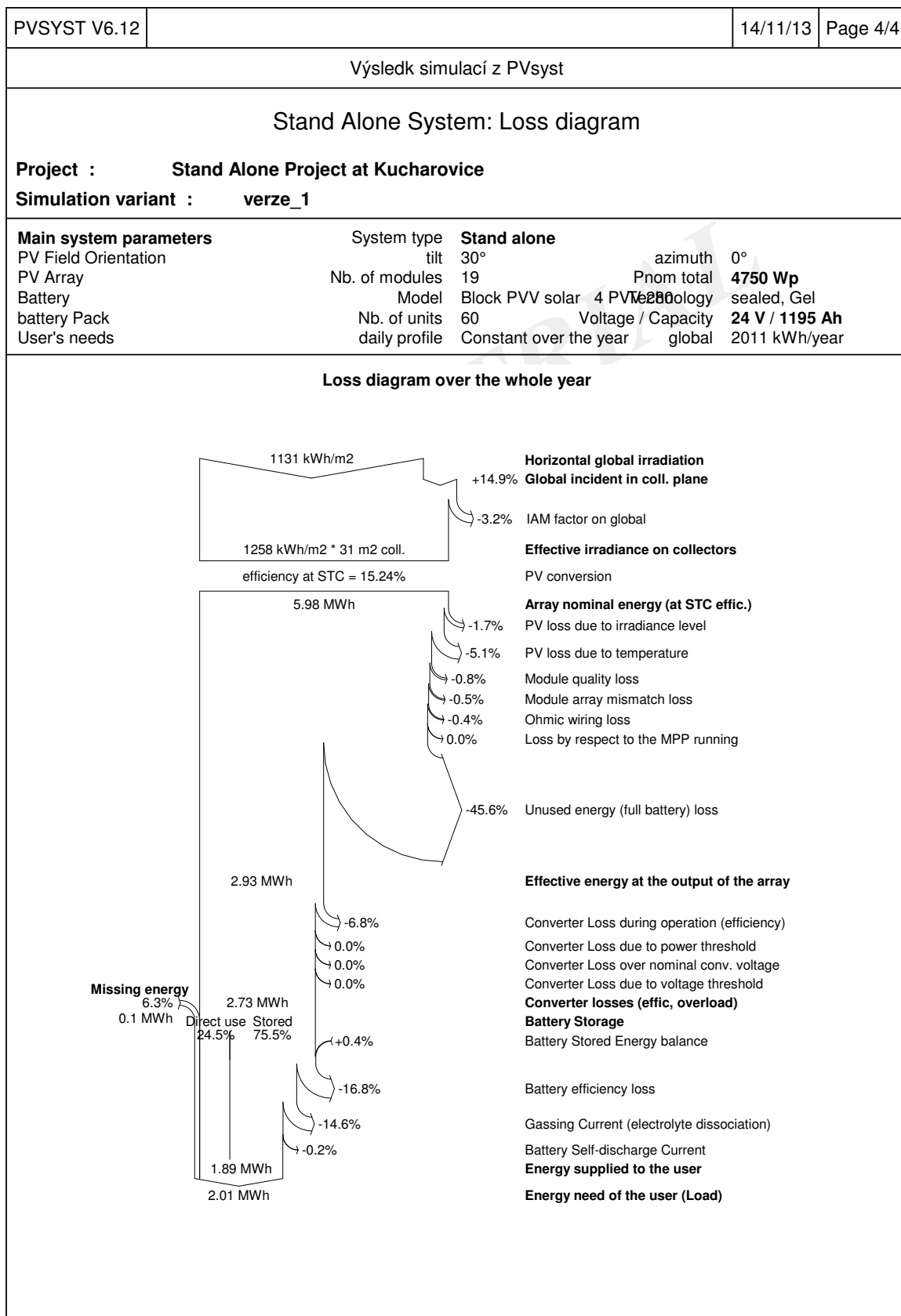
Výstup z PVSYST

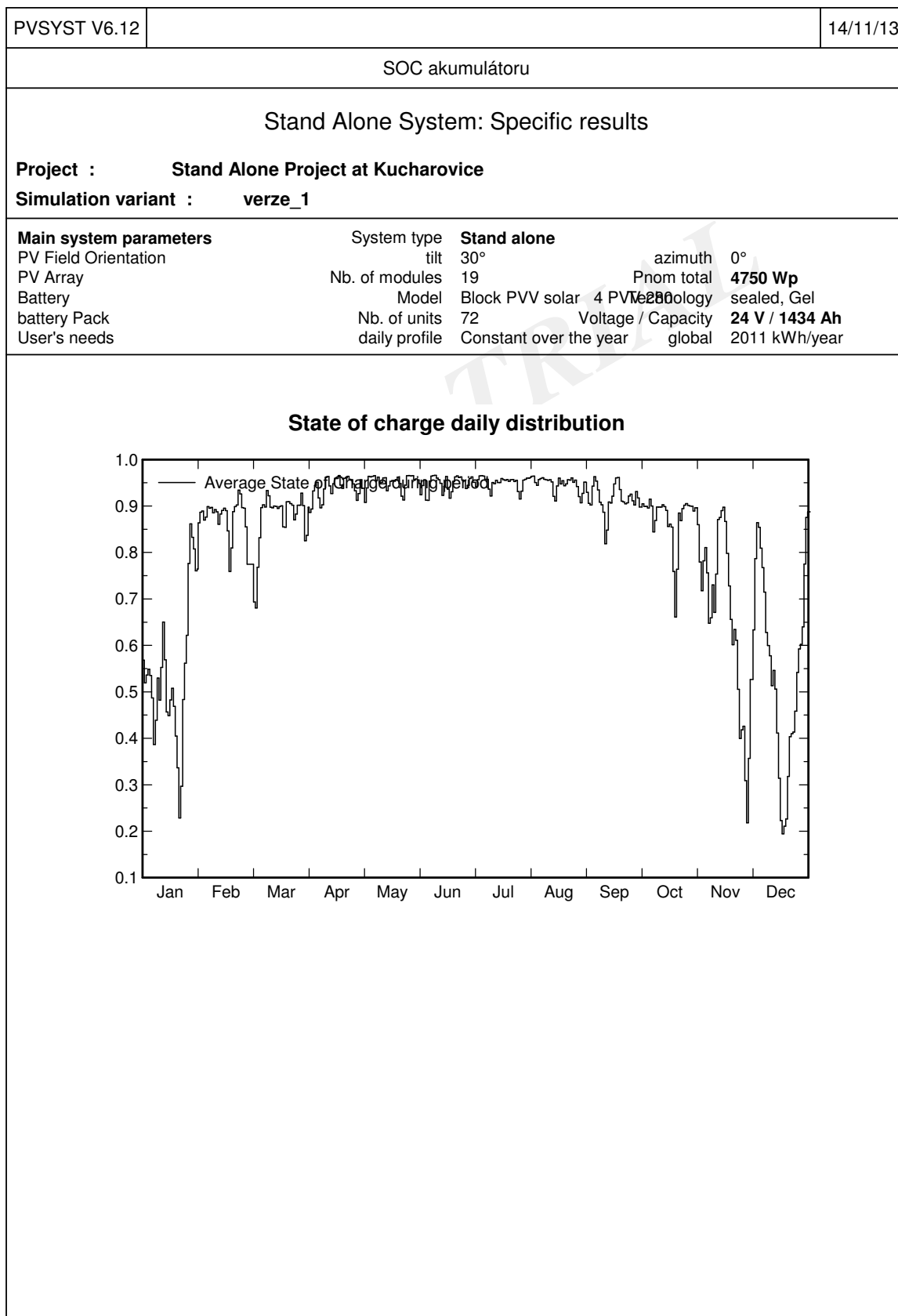
Výsledky z testování objektu, který byl navržen v části 7, a který byl shodný (až na výrobce akumulátorů) s testování v prostředí Homer Energy.

PVSYST V6.12											14/11/13	Page 1/4	
Výsledek simulací z PVsyst													
Stand Alone System: Simulation parameters													
Project : Stand Alone Project at Kucharovice													
Geographical Site		Kucharovice				Country		Czech Republic					
Situation		Latitude		48.9°N		Longitude		16.1°E					
Time defined as		Legal Time		Time zone UT+1		Altitude		316 m					
		Albedo		0.20									
Meteo data:		Kucharovice		Synthetic - Meteonorm 6.1									
Simulation variant : verze_1													
Simulation date 14/11/13 11h33													
Simulation parameters													
Collector Plane Orientation				Tilt		30°		Azimuth		0°			
Models used				Transposition		Perez		Diffuse		Measured			
PV Array Characteristics													
PV module		Si-poly		Model		Conergy E 250P							
				Manufacturer		Conergy							
Number of PV modules				In series		1 modules		In parallel		19 strings			
Total number of PV modules				Nb. modules		19		Unit Nom. Power		250 Wp			
Array global power				Nominal (STC)		4750 Wp		At operating cond.		4241 Wp (50°C)			
Array operating characteristics (50°C)				U mpp		27 V		I mpp		157 A			
Total area				Module area		31.2 m_c		Cell area		27.7 m _c			
PV Array loss factors													
Thermal Loss factor				Uc (const)		20.0 W/m _c K		Uv (wind)		0.0 W/m _c K / m/s			
Wiring Ohmic Loss				Global array res.		2.9 mOhm		Loss Fraction		1.5 % at STC			
Module Quality Loss								Loss Fraction		1.5 %			
Module Mismatch Losses								Loss Fraction		1.0 % at MPP			
Incidence effect, ASHRAE parametrization				IAM =		1 - bo (1/cos i - 1)		bo Param.		0.05			
System Parameter				System type		Stand Alone System							
Battery				Model		Block PVV solar 4 PVV 280							
				Manufacturer		BAE Secura							
Battery Pack Characteristics				Voltage		24 V		Nominal Capacity		1195 Ah			
				Nb. of units		12 in series x 5 in parallel							
				Temperature		Fixed (20°C)							
Regulator				Model		Generic Default with MPPT converter							
				Technology		MPPT converter		Temp coeff.		-5.0 mV/°C/elem.			
Converter		Maxi and EURO efficiencies		97.0/95.0 %									
Battery Management Thresholds		Charging		27.0/26.2 V		Discharging		23.5/25.2 V					
		Back-Up Genset Command		23.6/25.8 V									
User's needs :													
		daily profile		Constant over the year									
		average		5.5 kWh/Day									
	0 h	1 h	2 h	3 h	4 h	5 h	6 h	7 h	8 h	9 h	10 h	11 h	
	12 h	13 h	14 h	15 h	16 h	17 h	18 h	19 h	20 h	21 h	22 h	23 h	
Hourly load	50	50	50	50	50	50	50	50	100	300	1000	300	W
	300	500	100	300	300	300	300	100	100	1000	60	50	W





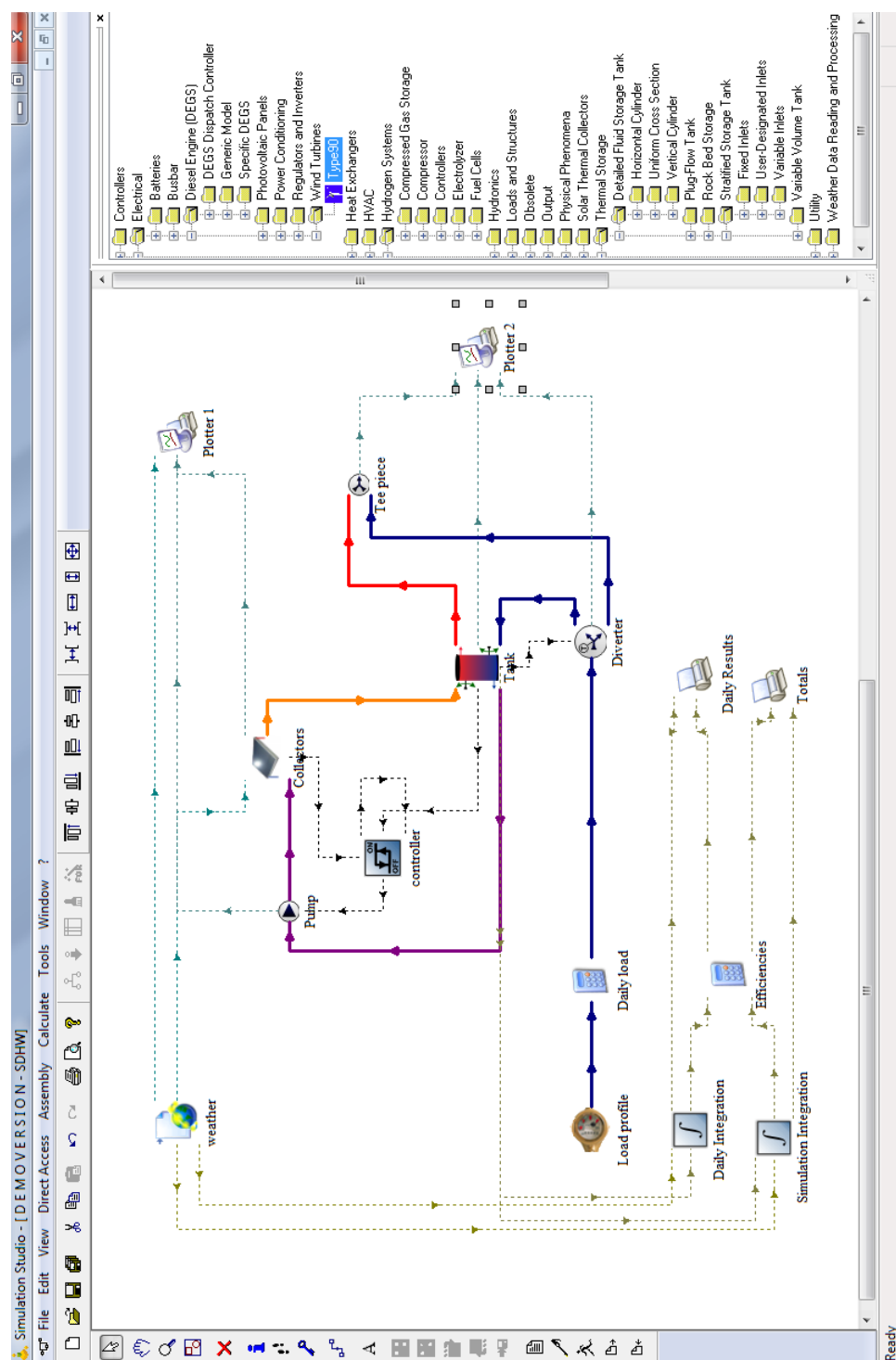




Příloha C

Výstup z TRNSYS

TRNSYS je spíše dalším možným testovacím prostředím určeným k modelování energetických celků. Výhodou systému je jeho otevřenost, i když platforma je komerčním produktem. Díky této vlastnosti je systém vybaven balíčky s funkčními modely základních prvků (např. vlastnostmi základních vodíkových palivových článků). Na obrázku C.1 je znázorněno pracovní prostředí s výběrem balíků. Konkrétní simulace provedena nebyla.

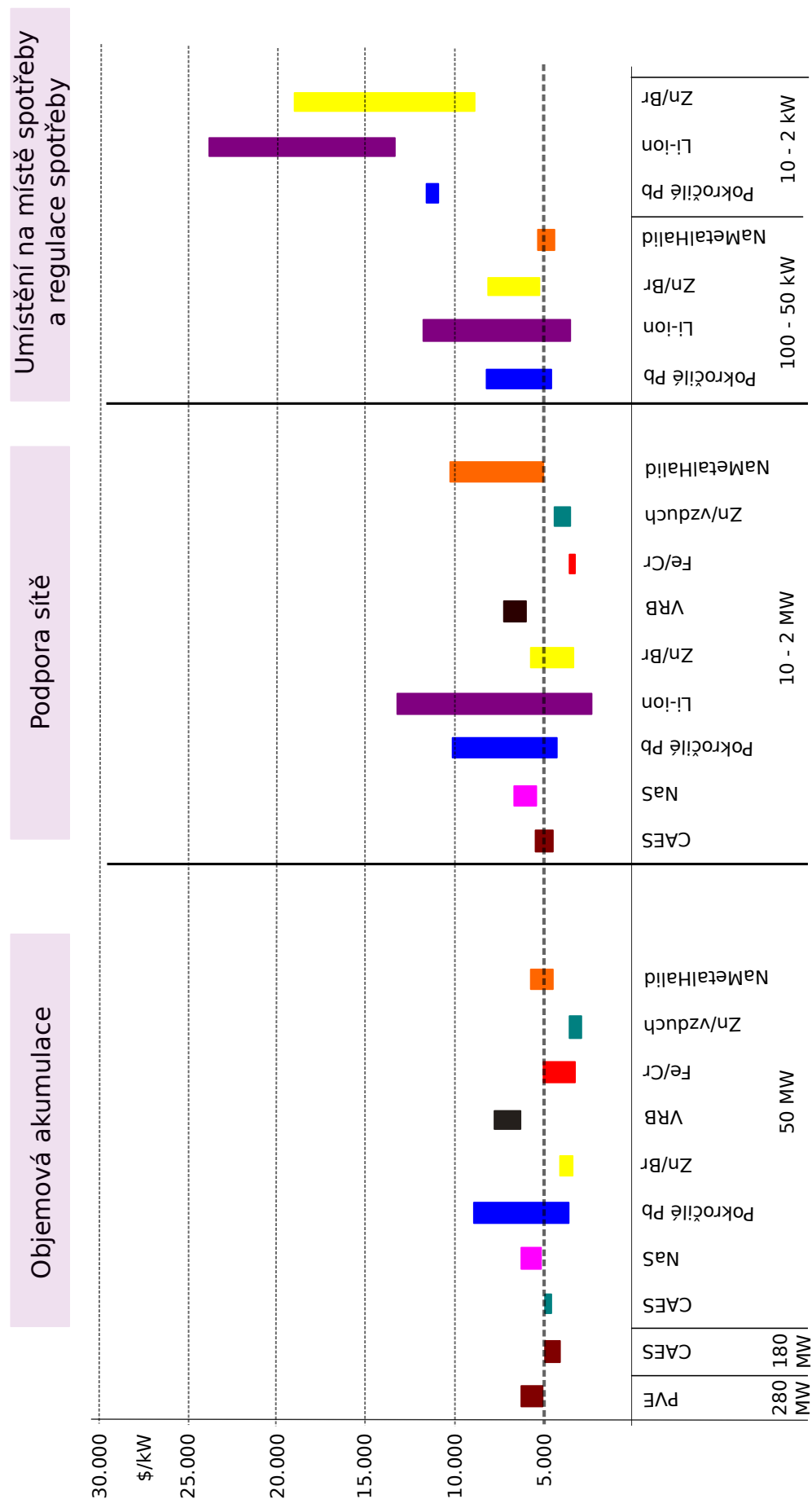


Obr. C.1: Pracovní prostředí softwaru TRNSYS, který je primárně vytvářen pro modelování energetických soustav

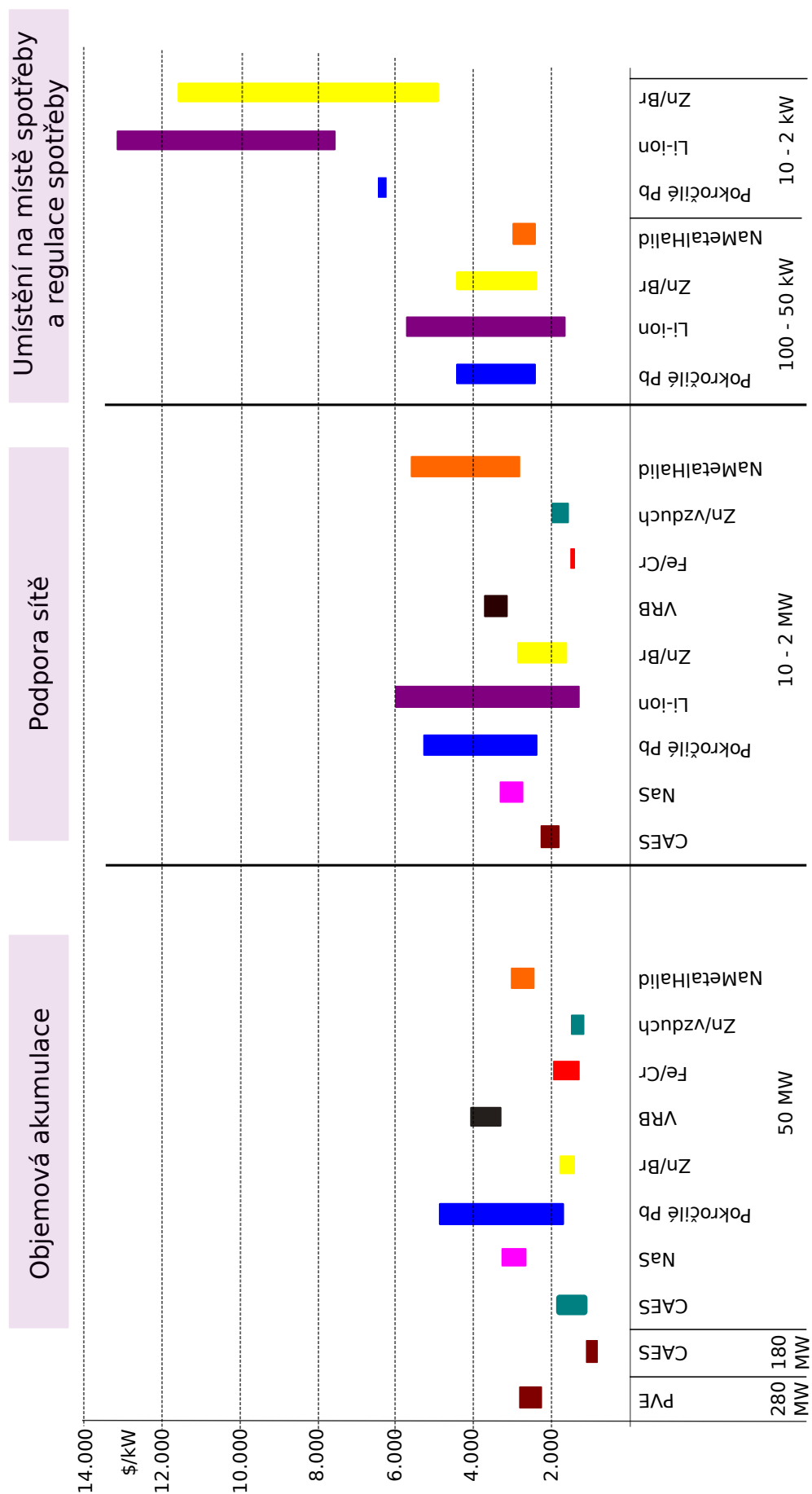
Příloha D

Resumé nákladů jednotlivých technologií

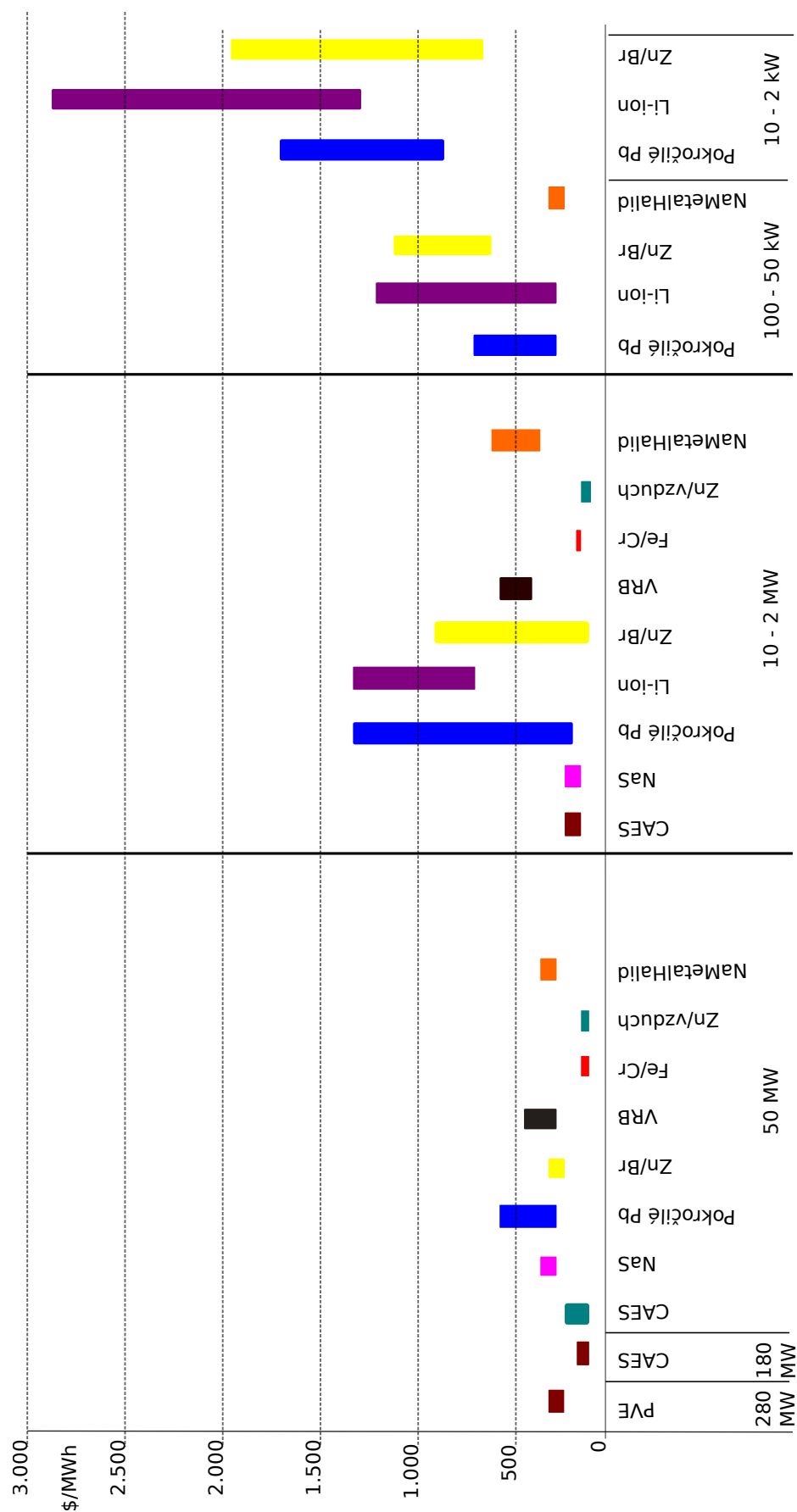
Kapitola graficky shrnuje dosavadní zkušenosti s nasazením akumulčních prostředků. Následují tři grafické výstupy, které reflektují aktuální (rok 2012) cenové rozpětí mezi jednotlivými technologiemi. Bližší informace jsou uvedeny v popisu u diagramů.



Obr. D.1: Typ technologie pro konkrétní systém versus současné náklady na instalaci. Počítáno pro životnost 15 roků, při ceně plynu 2,5 Kč/m³ pro metodu CAES (cena plynu v USA) a ceně 600 Kč/MWh elektřiny mimo špičku pro nabíjení Poznámka: Veškeré náklady jsou pro rok 2012, náklady se budou lišit v závislosti na místních specifických podmínkách. [57]



Obr. D.2: Typ technologie pro konkrétní velikost soustavy versus celkové náklady elektrárny (\$/kW), rozsah cen zahrnuje: a) technologie, b) čas akumulace, c) návratnost investice [57]



Obr. D.3: Typ technologie pro konkrétní systém versus úroveň nákladů na energii (\$/MWh). Počítáno pro životnost 15 roků, při ceně plynu 2,5 Kč/m³ pro metodu CAES (cena plynu v USA) a ceně 600 Kč/MWh elektriny mimo špičku pro nabíjení Poznámka: Všechny náklady jsou pro rok 2012, náklady se budou lišit v závislosti na místních specifických podmínkách. [57]

Příloha E

Výstupy z monitorovací jednotky akumulátoru VRB

Záznamy z monitorovací jednotky akumulátoru VRB od firmy Prudent. Sekce je rozdělena na:

- data při nabíjení,
- data při vybíjení.

Tyto data byla načtena z prvního ověřovacího provozu, který sestával pouze z jednoho cyklu – nabíjení a vybíjení.

Z dat nabíjení můžeme vidět, že prvotní nabíjecí proud je poměrně velký – 119,5 A. S postupem času klesá, jak se zvyšuje napětí článku. Zajímavé je, že výrobce rozdělil koeficient nabíjení (SOC) na dvě podskupiny CAPACITY, která je zjevně určujícím parametrem stavu nabití akumulátoru. Má to příčinu v ochraně akumulátoru před podbíjením. Naopak při plném nabití (CAPACITY = 100 %) je koeficient SOC roven hodnotě 73 %. Otáčky čerpadel – PEMOTRPM a NEMOTRPM – se pohybují v rozmezí (2569 – 2649) min^{-1} a proudy jsou (PEMOTORI a NEMOTORI) 7,1 A pro pravé a 5,6 A pro levé čerpadlo. To znamená, že průtok elektrolytu článkem je maximální. Tuto skutečnost reflektují i tlakové poměry (PEPRESS a NEPRESS) v obou větvích, jejichž hodnoty jsou rovny 110 kPa. Teplota kapaliny (PETEMP a NETEMP) klesala se snižujícím se proudem. Rozdílný proud čerpadel může být způsoben zapojením příváděcího potrubí. Některé části nemusí být hydraulicky čisté. Ostatní hodnoty popisují stav řídicí jednotky.

Vybíjení bylo prováděno konstantním proudem 40 A. Z technických důvodů nebylo možné pokusit se změřit několik rozdílných vybíjecích charakteristik. Nicméně lze poukázat opět na rychle klesající hodnotu CAPACITY, vůči SOC. Jelikož byl akumulátor vybíjen konstantním proudem na úrovni 1/4 maximálního vybíjecího proudu, nebyla čerpadla naplna vytížena (otáčky poklesly na hodnoty blízké 2000 min^{-1}) a také tlaky oscilovaly kolem hodnoty 70 kPa. Pouze u konce vybíjecího cyklu, bylo nutno zvýšit průtok kapaliny, což znamená zvýšené otáčky i tlaky v potrubí. Tuto skutečnost popisuje obrázek 5.21 na straně 71.

Nabíjení:

STACKI: -119.5A
REFV: 1.359V
STACKV: -56.0V
BUSV: -56.0V
PEPRESS: 110KPA
NEPRESS: 111KPA
PETEMP: 27DEGC
NETEMP: 24DEGC
AMBTMP: 24DEGC
RECTEMP: 26DEGC
HSTEMP: 29DEGC
CPUTEMP: 25DEGC
PEMOTORI: 7.4A
NEMOTORI: 5.8A
DIFFPRESS: 1KPA
SOC: 33%
CAPACITY: 0%
RESISTANCE: 2.7OHMCM^2
PEMOTRPM: 2642RPM
NEMOTRPM: 2569RPM
AUXPEMOTRPM: 2643RPM
AUXNEMOTRPM: 2570RPM
PMPCTRL: 1
CONTACTOR: 1
STACKFAN: 0
CPUFAN: 1
EXTIN1=1
EXTIN2=1
EXTIN3=1
RUNTIME: 151SEC
VER: 1363000
REV: 0
STATE: CONNECTED
CTEVENTS: 00000000
MJEVENTS: 00000000
MNEVENTS: 00000000

14:37
STACKI: -76.5A
REFV: 1.435V
STACKV: -56.3V
BUSV: -56.3V
PEPRESS: 110KPA
NEPRESS: 110KPA
PETEMP: 26DEGC
NETEMP: 25DEGC
AMBTMP: 26DEGC
RECTEMP: 37DEGC
HSTEMP: 44DEGC
CPUTEMP: 46DEGC
PEMOTORI: 7.1A
NEMOTORI: 5.6A
DIFFPRESS: 0KPA
SOC: 58%
CAPACITY: 62%
RESISTANCE: 2.7OHMCM^2
PEMOTRPM: 2646RPM
NEMOTRPM: 2575RPM
AUXPEMOTRPM: 2647RPM
AUXNEMOTRPM: 2575RPM
PMPCTRL: 1
CONTACTOR: 1
STACKFAN: 0
CPUFAN: 1
EXTIN1=1
EXTIN2=1
EXTIN3=1
RUNTIME: 13532SEC
VER: 1363000
REV: 0
STATE: CONNECTED
CTEVENTS: 00000000
MJEVENTS: 00000000
MNEVENTS: 00000028

Nabíjení:

16:48
STACKI: -59.5A
REFV: 1.466V
STACKV: -56.4V
BUSV: -56.4V
PEPRESS: 110KPA
NEPRESS: 110KPA
PETEMP: 26DEGC
NETEMP: 25DEGC
AMBTMP: 26DEGC
RECTEMP: 37DEGC
HSTEMP: 44DEGC
CPUTEMP: 46DEGC
PEMOTORI: 7.1A
NEMOTORI: 5.6A
DIFFPRESS: 0KPA
SOC: 68%
CAPACITY: 88%
RESISTANCE: 2.7OHMCM^2
PEMOTRPM: 2649RPM
NEMOTRPM: 2581RPM
AUXPEMOTRPM: 2650RPM
AUXNEMOTRPM: 2582RPM
PMPCTRL: 1
CONTACTOR: 1
STACKFAN: 0
CPUFAN: 1
EXTIN1=1
EXTIN2=1
EXTIN3=1
RUNTIME: 21238SEC
VER: 1363000
REV: 0
STATE: CONNECTED
CTEVENTS: 00000000
MJEVENTS: 00000000
MNEVENTS: 00000028

17:55
STACKI: -51.5A
REFV: 1.480V
STACKV: -56.4V
BUSV: -56.4V
PEPRESS: 110KPA
NEPRESS: 110KPA
PETEMP: 26DEGC
NETEMP: 25DEGC
AMBTMP: 26DEGC
RECTEMP: 37DEGC
HSTEMP: 44DEGC
CPUTEMP: 45DEGC
PEMOTORI: 7.1A
NEMOTORI: 5.6A
DIFFPRESS: 0KPA
SOC: 73%
CAPACITY: 100%
RESISTANCE: 2.8OHMCM^2
PEMOTRPM: 2648RPM
NEMOTRPM: 2581RPM
AUXPEMOTRPM: 2649RPM
AUXNEMOTRPM: 2582RPM
PMPCTRL: 1
CONTACTOR: 1
STACKFAN: 0
CPUFAN: 1
EXTIN1=1
EXTIN2=1
EXTIN3=1
RUNTIME: 25377SEC
VER: 1363000
REV: 0
STATE: CONNECTED
CTEVENTS: 00000000
MJEVENTS: 00000000
MNEVENTS: 0000002A

Vybíjení:

STACKI: 0.0A
REFV: 1.483V
STACKV: -52.7V
BUSV: -52.7V
PEPRESS: 74KPA
NEPRESS: 73KPA
PETEMP: 23DEGC
NETEMP: 23DEGC
AMBTMP: 25DEGC
RECTEMP: 35DEGC
HSTEMP: 42DEGC
CPUTEMP: 43DEGC
PEMOTORI: 4.5A
NEMOTORI: 4.1A
DIFFPRESS: 1KPA
SOC: 74%
CAPACITY: 100%
RESISTANCE: NA
PEMOTRPM: 2084RPM
NEMOTRPM: 2050RPM
AUXPEMOTRPM: 2085RPM
AUXNEMOTRPM: 2051RPM
PMPCTRL: 1
CONTACTOR: 1
STACKFAN: 0
CPUFAN: 1
EXTIN1=1
EXTIN2=1
EXTIN3=1
RUNTIME: 8489SEC
VER: 1363000
REV: 0
STATE: CONNECTED
CTEVENTS: 00000000
MJEVENTS: 00000000
MNEVENTS: 00000002

16:28
STACKI: 40.0A
REFV: 1.426V
STACKV: -47.5V
BUSV: -47.5V
PEPRESS: 71KPA
NEPRESS: 71KPA
PETEMP: 23DEGC
NETEMP: 23DEGC
AMBTMP: 24DEGC
RECTEMP: 31DEGC
HSTEMP: 36DEGC
CPUTEMP: 40DEGC
PEMOTORI: 4.5A
NEMOTORI: 3.6A
DIFFPRESS: 0KPA
SOC: 55%
CAPACITY: 54%
RESISTANCE: 4.3OHMCM^2
PEMOTRPM: 2061RPM
NEMOTRPM: 2028RPM
AUXPEMOTRPM: 2062RPM
AUXNEMOTRPM: 2028RPM
PMPCTRL: 1
CONTACTOR: 1
STACKFAN: 0
CPUFAN: 1
EXTIN1=1
EXTIN2=1
EXTIN3=1
RUNTIME: 15795SEC
VER: 1363000
REV: 0
STATE: CONNECTED
CTEVENTS: 00000000
MJEVENTS: 00000000
MNEVENTS: 00000000

Vybíjení:

9:18 pokračování vybíjení

STACKI: 40.0A
REFV: 1.423V
STACKV: -47.1V
BUSV: -47.1V
PEPRESS: 71KPA
NEPRESS: 71KPA
PETEMP: 23DEGC
NETEMP: 22DEGC
AMBTMP: 23DEGC
RECTEMP: 29DEGC
HSTEMP: 33DEGC
CPUTEMP: 33DEGC
PEMOTORI: 4.7A
NEMOTORI: 4.3A
DIFFPRESS: 1KPA
SOC: 54%
CAPACITY: 52%
RESISTANCE: 4.6OHMCM^2
PEMOTRPM: 2057RPM
NEMOTRPM: 2036RPM
AUXPEMOTRPM: 2058RPM
AUXNEMOTRPM: 2037RPM
PMPCTRL: 1
CONTACTOR: 1
STACKFAN: 0
CPUFAN: 1
EXTIN1=1
EXTIN2=1
EXTIN3=1
RUNTIME: 161SEC
VER: 1363000
REV: 0
STATE: CONNECTED
CTEVENTS: 00000000
MJEVENTS: 00000000
MNEVENTS: 00000000

9:28

STACKI: 40.0A
REFV: 1.422V
STACKV: -47.2V
BUSV: -47.2V
PEPRESS: 70KPA
NEPRESS: 70KPA
PETEMP: 23DEGC
NETEMP: 22DEGC
AMBTMP: 23DEGC
RECTEMP: 30DEGC
HSTEMP: 34DEGC
CPUTEMP: 36DEGC
PEMOTORI: 4.6A
NEMOTORI: 4.2A
DIFFPRESS: 0KPA
SOC: 54%
CAPACITY: 51%
RESISTANCE: 4.5OHMCM^2
PEMOTRPM: 2053RPM
NEMOTRPM: 2021RPM
AUXPEMOTRPM: 2054RPM
AUXNEMOTRPM: 2022RPM
PMPCTRL: 1
CONTACTOR: 1
STACKFAN: 0
CPUFAN: 1
EXTIN1=1
EXTIN2=1
EXTIN3=1
RUNTIME: 687SEC
VER: 1363000
REV: 0
STATE: CONNECTED
CTEVENTS: 00000000
MJEVENTS: 00000000
MNEVENTS: 00000000

Vybíjení:

14:14
STACKI: 40.0A
REFV: 1.362V
STACKV: -44.8V
BUSV: -44.9V
PEPRESS: 88KPA
NEPRESS: 88KPA
PETEMP: 24DEGC
NETEMP: 24DEGC
AMBTMP: 25DEGC
RECTEMP: 33DEGC
HSTEMP: 38DEGC
CPUTEMP: 42DEGC
PEMOTORI: 6.3A
NEMOTORI: 5.4A
DIFFPRESS: 0KPA
SOC: 34%
CAPACITY: 0%
RESISTANCE: 4.7OHMCM^2
PEMOTRPM: 2333RPM
NEMOTRPM: 2275RPM
AUXPEMOTRPM: 2334RPM
AUXNEMOTRPM: 2276RPM
PMPCTRL: 1
CONTACTOR: 1
STACKFAN: 0
CPUFAN: 1
EXTIN1=1
EXTIN2=1
EXTIN3=1
RUNTIME: 16218SEC
VER: 1363000
REV: 0
STATE: CONNECTED
CTEVENTS: 00000000
MJEVENTS: 00000000
MNEVENTS: 00000000

Příloha F

Porovnání průběhů ze zdrojů LiFePO_4 a Pb akumulátoru

Akumulátor je možné modelovat na základě principu, že napětí naprázdno je funkcí elektrického náboje respektující nabití akumulátoru a vnitřní odpor je funkcí nabití a protékajícího proudu:

$$U_0 = U_0(q) \quad (\text{F.1})$$

a

$$R_i = R_i(q, i_p) \quad (\text{F.2})$$

Pro model byl akumulátor nabit a hledala se optimální funkce, splňující předpoklad:

$$u_{sv} = U_0(q) - i_p R_i(q, i_p) \quad (\text{F.3})$$

Následně byla funkce popsána následující rovnicí:

$$U = v_1(Q) - i_p \left(v_2(Q) + v_3 \frac{i_p}{\sqrt{i_p^2 + 1,5}} \right) \quad (\text{F.4})$$

kde

$v_n \dots$ jsou obecné koeficienty závislé na stupni nabití akumulátoru, zjištěné funkcí FindFit (1)

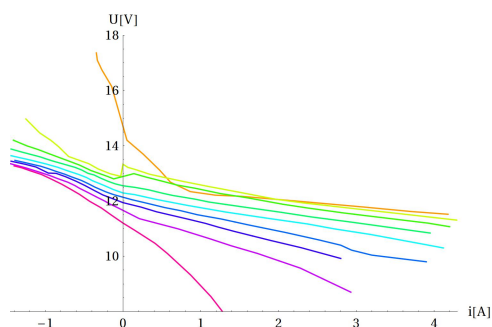
Více lze nalézt o modelování v [A15]. Na dalších obrázcích F.13 až F.14 je ukázán průběh testování a výsledný model je na obrázcích F.1 a F.2. Postupně takto byly změřeny jednotlivé průběhy při různém stupni nabití a různé zátěži. Matematický model byl vytvořen pouze pro olovený článek v prostředí Mathematica. Přesto se dále nevěnovalo tomuto tématu, protože těchto modelů existuje velké množství (např. [6]) a nebylo předmětem této práce analyzovat ostatní známé typy akumulátorů.

Vybíjecí charakteristiky

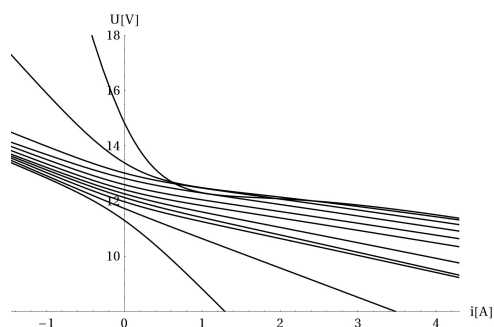
Pro vybíjecí a nabíjecí průběhy byly vybrány malé akumulátory, které mají stejnou charakteristiku jako velké články stejného druhu. Konkrétně se jednalo o olovený akumulátor s parametry: 6 V, 4 Ah. Lithiový akumulátor reprezentoval typ LiFePO_4 s PCM (přepětová ochrana) s parametry: 6 V, 3,8 Ah.

Nabíjecí charakteristiky

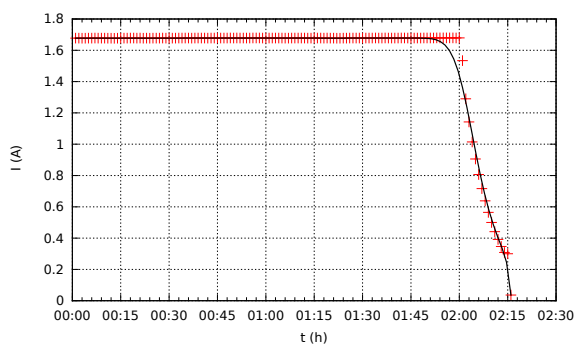
Nabíjecí charakteristiky vycházejí ze stejných akumulátorů jako v předchozí kapitole.



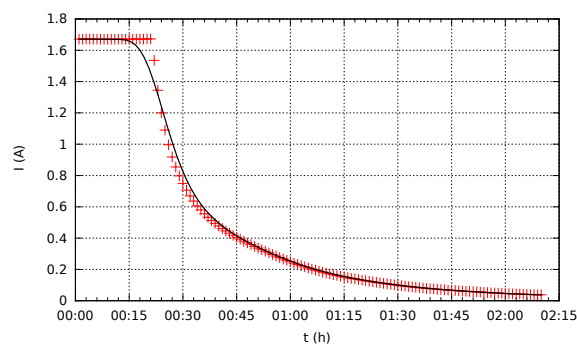
Obr. F.1: Volt-ampérová charakteristika pro více zatěžovacích křivek z měření



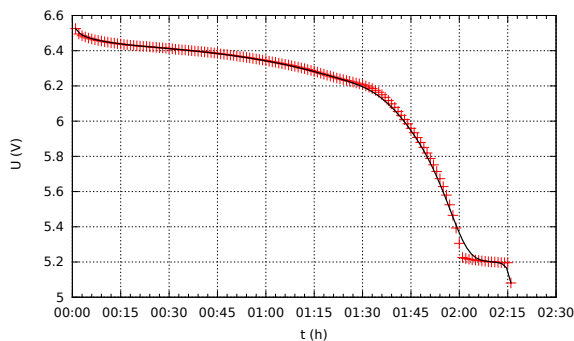
Obr. F.2: Volt-ampérová charakteristika s regresní funkcí z prostředí Mathematica



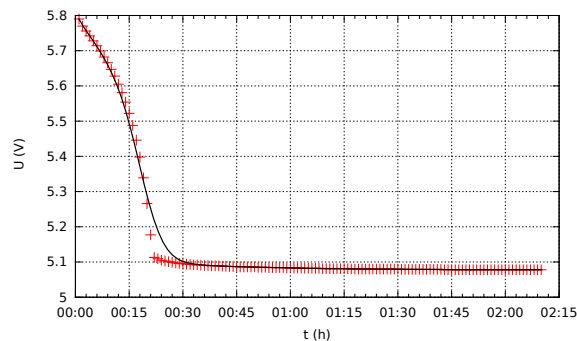
Obr. F.3: Průběh odběru proudu lithiového akumulátoru



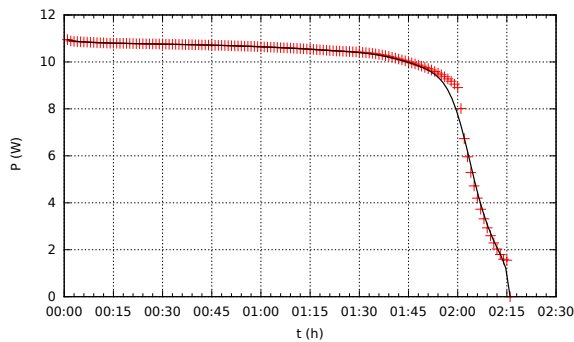
Obr. F.4: Průběh odběru proudu olověného akumulátoru



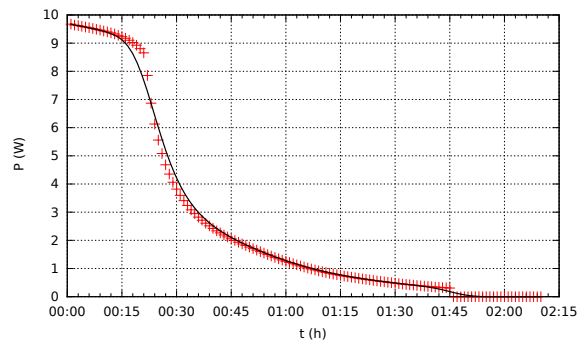
Obr. F.5: Průběh napětí při vybíjení lithiového akumulátoru



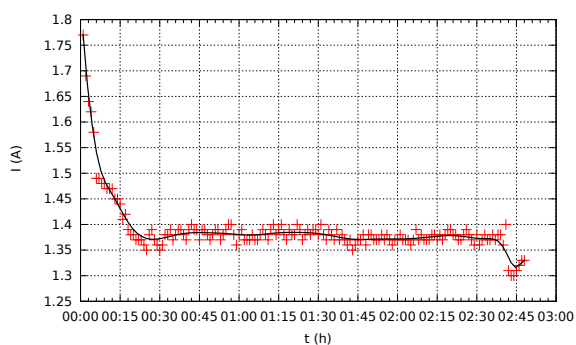
Obr. F.6: Průběh napětí při vybíjení olověného akumulátoru



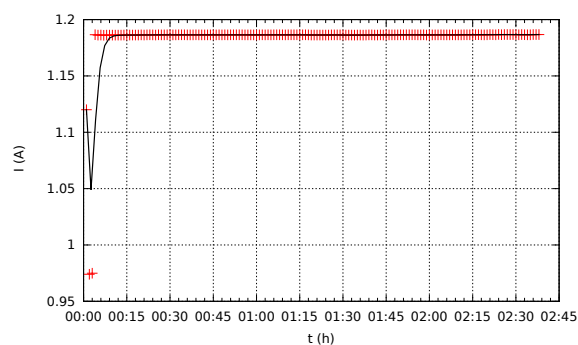
Obr. F.7: Odebíraný výkon lithiového akumulátoru



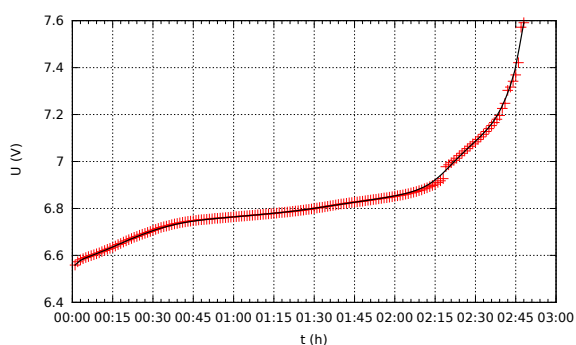
Obr. F.8: Odebíraný výkon olověného akumulátoru



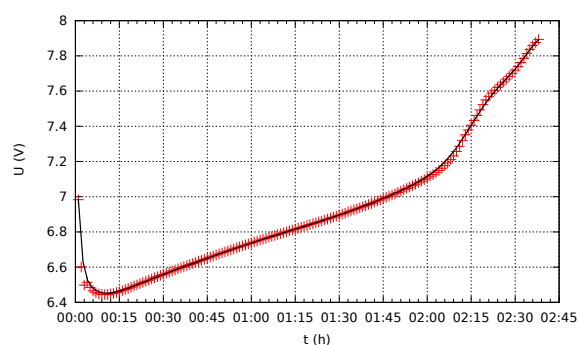
Obr. F.9: Průběh nabíjecího proudu lithiového akumulátoru



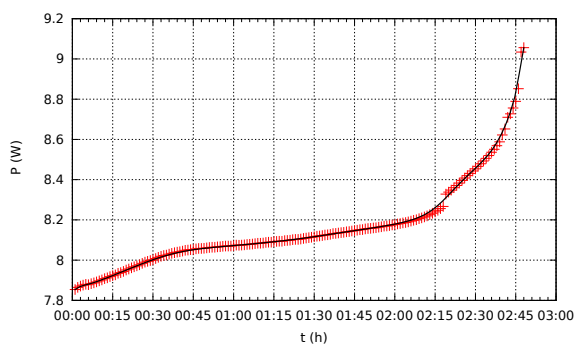
Obr. F.10: Průběh nabíjecího proudu olověného akumulátoru



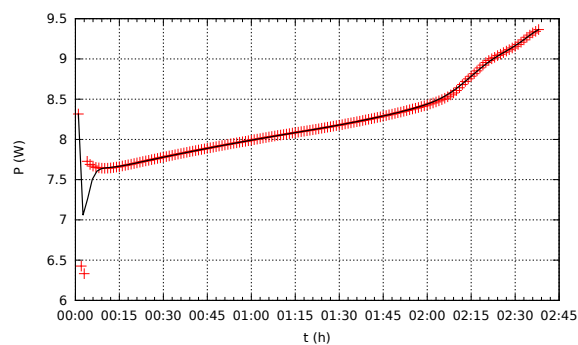
Obr. F.11: Průběh napětí při nabíjení lithiového akumulátoru



Obr. F.12: Průběh napětí při nabíjení olověného akumulátoru



Obr. F.13: Dodávaný výkon lithiovému akumulátoru



Obr. F.14: Dodávaný výkon olověnému akumulátoru