

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**

FOTOVOLTAICKÝ ON-GRID SYSTÉM S AKUMULACÍ

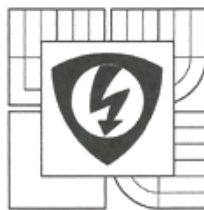
PHOTOVOLTAIC ON-GRID SYSTEM WITH ACCUMULATION

**DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS**

**AUTOR PRÁCE
AUTHOR**

BC. KIJOVSKÝ FRANTIŠEK

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektroenergetika

Student: Bc. František Kijovský
Ročník: 2

ID: 98248
Akademický rok: 2011/12

NÁZEV TÉMATU:

Fotovoltaický on-grid systém s akumulací

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Současné vývojové trendy v oblasti FV systémů
2. Hybridní FV systémy - specifické vlastnosti akumulačních systémů
3. Návrh technického řešení energetického systému
4. Vyhodnocení technické realizovatelnosti systému a jeho ekonomické zhodnocení

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 6.2.2012

Termín odevzdání: 18.5.2012

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Mastný, Ph.D.

Konzultanti diplomové práce:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda oborové rady



UPOZORNĚNÍ:

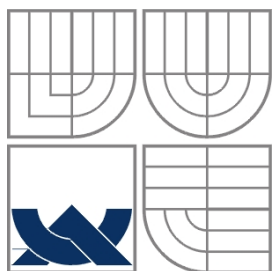
Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Bibliografická citace práce:

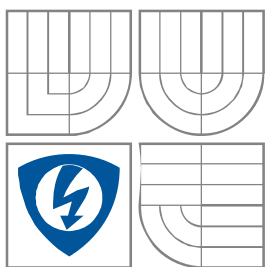
KJOVSKÝ, F. *Fotovoltaický on-grid systém s akumulací*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 79 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Petr Mastný, Ph.D..

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. Díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

.....



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

FOTOVOLTAICKÝ ON-GRID SYSTÉM S AKUMULACÍ

THE PHOTOVOLTAIC SYSTEM WITH ON-GRID ACCUMULATION

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. František Kijovský

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Mastný, Ph.D.

BRNO, 2012

ABSTRAKT

Diplomová práca si dáva za úlohu spracovať problematiku súčasných vývojových trendov v oblasti on-grid fotovoltaiického systému s akumuláciou. Skúma možnosti akumulácie vo fotovoltaiických systémoch, rozoberá ich klady a zápory v praktickom nasadení. Porovnáva jednotlivé akumulčné technológie na základe ukazovateľov počtu cyklov, životnosti a cenovej relácie. Praktická časť práce sa zaoberá technickým riešením hybridného energetického systému a následným porovnaním so štandardným on-grid systémom z technického a ekonomického hľadiska.

KEÚČOVÉ SLOVÁ:

akumulátor; fotovoltaiika; VRB systém; on – grid; hybridný fotovoltaiický systém;

ABSTRACT

This thesis deals with processing the current issue of trends in on-grid photovoltaic system with accumulation. It examines the possibility of accumulation of photovoltaic systems, analyzing their strengths and weaknesses in the practical deployment. It compares the different storage technologies based on indicators of cycles, durability and price ranges. The practical part deals with the technical design of hybrid power system and then comparing with the standard on-grid system in technical and economical point of view.

KEY WORDS:

batteries; photovoltaics; VRB system; on-grid, hybrid photovoltaic system;

OBSAH

ZOZNAM OBRÁZKOV.....	10
ZOZNAM TABULIEK.....	12
ZOZNAM SYMBOLOV.....	14
ZOZNAM SKRATIEK.....	15
1 ÚVOD.....	16
1.1 LEGISLATÍVA.....	17
2 FOTOVOLTAICKÝ PANEL	20
2.1 ELEKTRICKÉ PARAMETRE FV PANELA	21
2.2 TEPLOTNÁ ZÁVISLOSŤ FV PANELU.....	22
2.3 VPLYV ORIENTÁCIE NA VÝKON FV PANELA	23
3 SÚČASNÉ AKUMULAČNÉ TRENDY VO FV APLIKÁCIÁCH.....	25
3.1 NiCd AKUMULÁTORY	25
3.1.1 ELEKTROCHEMICKÉ REAKCIE PRI NABÍJANÍ A VYBÍJANÍ NiCd AKUMULÁTOROV	25
3.2 NiMH AKUMULÁTORY.....	29
3.2.1 ELEKTROCHEMICKÉ REAKCIE PRI NABÍJANÍ A VYBÍJANÍ NiMH AKUMULÁTOROV	29
3.2.2 NAPŤOVÝ POKLES NiMH AKUMULÁTOROV.....	30
3.3 PBA AKUMULÁTORY	31
3.3.1 ELEKTROCHEMICKÉ REAKCIE PRI NABÍJANÍ A VYBÍJANÍ PBA AKUMULÁTOROV	33
4 POROVNANIE NiCd, NiMH A PBA TECHNOLOGIÍ	35
5 VODÍKOVÁ AKUMULÁCIA VO FV SYSTÉMOCH	37
5.1 SUBSYSTÉM ZAISŤUJÚCI ELEKTROLÝZU	37
5.2 SUBSYSTÉM PALIVOVÉHO ČLÁNKU.....	38
6 VRB SYSTÉM ENERGETICKEJ AKUMULÁCIE	41
7 STRIEDAČE.....	43
7.1 POŽIADAVKY NA STRIEDAČ DEFINOVANÉ FOTOVOLTAICKÝMI MODULMI	45
7.2 VÝVOJ STRIEDAČOV.....	46
8 REGULÁCIA NABÍJANIA	48
8.1 . NABÍJANIE AKUMULÁTOROV TYPU PBA.....	50
9 NÁVRH HYBRIDNÉHO FV SYSTÉMU.....	52
9.1 . POPIS RIEŠENÉHO OBJEKTU PRE NÁVRH FV ELEKTRÁRNE.....	52
9.2 . POPIS ENERGETICKEJ NÁROČNOSTI OBJEKTU	53
9.3 . NÁVRH INŠTALOVANÉHO VÝKONU PRE HYBRIDNÝ SYSTÉM	55
9.4 ZÁKLADNÉ PRVKY NAVRHOVANÉHO HYBRIDNÉHO FV SYSTÉMU.....	58
9.5 ROČNÁ ENERGETICKÁ BILANCIA NAVRHOVANÉHO HYBRIDNÉHO SYSTÉMU	60

9.6 ROČNÁ ENERGETICKÁ BILANCIA POROVNÁVANÉHO ON–GRID SYSTÉMU.....	62
10 EKONOMICKÉ ZHODNOTENIE	66
10.1 EKONOMICKÉ VSTUPY RIEŠENÝCH NÁVRHOV	66
10.2 CITLIVOSTNÁ ANALÝZA NA RIZIKO ZMENY PRODUKCIE ENERGIE.....	71
10.3 CITLIVOSTNÁ ANALÝZA NA RIZIKO ZMENY CENY FV PANELOV	72
10.4 CITLIVOSTNÁ ANALÝZA NA RIZIKO ZMENY CENY SILOVEJ ENERGIE	73
10.5 CITLIVOSTNÁ ANALÝZA NA RIZIKO ZMENY PREVÁDZKOVÝCH NÁKLADOV	74
11 ZÁVER.....	76
POUŽITÁ LITERATÚRA	78
PRÍLOHA A JEDNOPÓLOVÉ SCHÉMA HYBRIDNEJ FVE	80

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obr. 1-1	Znázornenie on-grid systému s akumuláčnym prvkom [1].....	16
obr. 1-2	Bloková schéma zapojenia pre zelený bonus a priamy výkup [2].....	19
Obr. 2-1	Pohľad na fotovoltaiický panel a jeho jednotlivé súčasti [3].....	20
Obr. 2-2	Ampér-voltová charakteristika FV panelu s vyznačenými základnými parametrami[4]	22
Obr. 2-3	Graf výkonu FV panelu MSX-64 ako funkcia intenzity ožiarenia a teploty.....	22
Obr. 2-4	Graf intenzity dopadajúceho slnečného žiarenia ako funkcie sklonu PV panelu a mesiaca v roku.....	23
Obr. 2-5	Graf intenzity priemerného ročného slnečného žiarenia vztiahnutého na deň ako funkcia sklonu PV panelu a azimutu.	24
Obr. 3-1	Schematické znázornenie chemických reakcií pre NiCd technológiu.	26
Obr. 3-2	Graf samovybijania pre teploty 20° a 40° NiCd akumulátora SUNICA plus [5].	27
Obr. 3-3	Graf závislosti cyklov na hĺbke vybitia pri teplotách 0°, 20° a 40° pre NiCd akumulátor Sunica plus [5]	27
Obr. 3-4	NiCd akumulátor SUNICA plus [5]	28
Obr. 3-5	NiMH akumulátor firmy SAFT, typ NHE [6]	29
Obr. 3-6	Vplyv čiastočného vybijania na kapacitu NiMH článku.....	30
Obr. 3-7	Olovené akumulátory firmy SEC modelová rada SEC-T-RANGE záplavovej konštrukcie [7].....	32
Obr. 3-8	Gélové olovené akumulátory firmy SEC, doskovej konštrukcie v regálovom uložení, vhodné na fotovoltaiické aplikácie [8]	34
Obr. 5-1	Bloková schéma on-grid fotovoltaiického systému s akumuláciou do vodíku [4].....	37
Obr. 5-2	Elektrolyzér s pevným polymérovým elektrolytom	38
Obr. 5-3	Schematický pohľad na časti palivového článku typu PEM [9].....	39
Obr. 6-1	Principiálny koncept systému VRB	41
Obr. 6-2	Principiálny koncept redukčno-oxidačného regeneračného článku.....	42
Obr. 7-1	Frekvenčné spektrum malej FVE – najnepriaznivejší priebeh [11]	44
Obr. 7-2	Frekvenčné spektrum malej FVE – najpriaznivejší priebeh [11]	44
Obr. 7-3	Schematický Model a A-V charakteristika fotovoltaiického článku.....	45
Obr. 7-4	Spôsob zapojenia fotovoltaiických striedačov.....	46
Obr. 8-1	Popis základných regulačných hodnôt [15]	48
Obr. 8-2	Blokové zapojenie paralelnej a sériovej regulácie nabíjania [15].....	49
Obr. 8-3	Dvojstupňový napäťový algoritmus nabíjania [13].....	50

<i>Obr. 8-4</i>	<i>Dvojstupňový prúdový algoritmus nabíjania [13].....</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 8-5</i>	<i>Pulzný algoritmus nabíjania [13].....</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 9-1</i>	<i>Situačná mapa riešeného objektu</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 9-2</i>	<i>Južný a východný pohľad riešeného objektu</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 9-3</i>	<i>Graf energetickej náročnosti jednotlivých systémov podľa tab. 9-2 za jeden rok</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 9-4</i>	<i>Rozvrhnutie fotovoltických panelov na streche riešeného objektu.....</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 9-5</i>	<i>Juhozápadný pohľad na vizualizáciu rozmiestnenia fotovoltických panelov</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 9-6</i>	<i>Juhovýchodný pohľad na vizualizáciu rozmiestnenia fotovoltických panelov.....</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 9-7</i>	<i>Regulátor nabíjania TriStar MPPT – 60 [16]</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 9-8</i>	<i>Hybridný striedač Studer Innotec XTM 4000-48 [17]</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 9-9</i>	<i>Solárny gélový akumulátor FG12-100DG [18]</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 9-10</i>	<i>FV panel SunWays SM230MD1A [19].....</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 9-11</i>	<i>Ročná energetická bilancia podľa tab. 9-10 pre navrhovaný hybridný systém.....</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 9-12</i>	<i>Diagram energetického toku hybridného systému za obdobie jeden rok.....</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 9-13</i>	<i>Koláčový graf rozdelenia energetického toku pre hybridný systém.....</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 10-6</i>	<i>Ročná energetická bilancia podľa tab. 9-11 pre zrovnávaný on-grid systém.....</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 9-15</i>	<i>Diagram energetického toku on-grid systému za obdobie jeden rok.....</i>	<i>63</i>
<i>Obr. 9-16</i>	<i>Koláčový graf rozdelenia energetického toku pre on-grid systém</i>	<i>63</i>
<i>Obr. 9-17</i>	<i>Bloková schéma pre navrhovaný hybridný systém.....</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 9-18</i>	<i>Rez technickou miestnosťou riešeného objektu</i>	<i>65</i>
<i>Obr. 10-1</i>	<i>Graf vplyvu produkcie energie na NPV, IRR a návratnosť investície.....</i>	<i>71</i>
<i>Obr. 10-2</i>	<i>Graf vplyvu zmeny ceny panelov na NPV, IRR a návratnosť investície.....</i>	<i>72</i>
<i>Obr. 10-3</i>	<i>Graf vplyvu zmeny ceny silovej energie na NPV, IRR a návratnosť investície</i>	<i>73</i>
<i>Obr. 10-4</i>	<i>Graf vplyvu zmeny prevádzkových nákladov na NPV, IRR a návratnosť investície .</i>	<i>74</i>
<i>Obr. 10-5</i>	<i>Graf skutočnej návratnosti investície ako funkcia ceny panelov a medziročného rastu elektrickej energie</i>	<i>75</i>

ZOZNAM TABULIEK

Tab. 1-1	Počiatkové výkupné ceny pre FV systémy inštalované v danom roku [21]	16
Tab. 1-2	Prehľad zákonov týkajúcich sa výrobcov elektrickej energie z OZE	17
Tab. 1-3	Výkupné ceny a zelené bonusy týkajúce sa FV systémov do 30kW [21]	19
Tab. 2-1	Hodnoty účinnosti pre jednotlivé typy technológií FV článkov pri 1000W/m ² , 25°C a AM = 1,5	20
Tab. 2-2	Prehľad základných elektrických parametrov FV panela	21
Tab. 2-3	Typické hodnoty ^a pre MSX-64	22
Tab. 2-4	Hodnoty maxím pre obr. 2–4	23
Tab. 2-5	Hodnoty maxím pre obr. 2–5	24
Tab. 3-1	Chemické procesy prebiehajúce na elektródach NiCd článku pri nabíjaní a vybíjaní	25
Tab. 3-2	Chemické procesy prebiehajúce na elektródach NiMH článku pri nabíjaní a vybíjaní	29
Tab. 3-3	Rozdelenie PbA akumulátorov podľa použitej technológie	31
Tab. 3-5	Chemické procesy prebiehajúce na elektródach PbA článku pri nabíjaní a vybíjaní	33
Tab. 4-1	Hodnoty korekčných faktorov životnosti pri zvolených operačných teplotách [22]	35
Tab. 4-2	Porovnanie typov akumulátorov využívaných vo FV systémoch [22]	35
Tab. 4-3	Porovnanie uvažovaných typov technológií využívaných vo FV systémoch [22]	36
Tab. 5-1	Reakcie prebiehajúce na katóde a anóde pri elektrolyze	38
Tab. 5-2	Popis označených komponentov palivového článku pre obr. 5–3	39
Tab. 5-3	Priemerná energetická účinnosť subsystémov hybridného systému [5]	40
Tab. 6-1	Popis redukčných a oxidačných procesov pre nabíjanie a vybíjanie VRB systému	41
Tab. 6-2	Základné technické parametre systému VRB [7]	42
Tab. 7-1	Súhrn štandardov z noriem týkajúcich sa napojenia FV systému na sieť [25]	43
Tab. 8-1	Vzťah medzi napätím naprázdno a mierou vybitia pre šesť článkových batériu typu PbA	49
Tab. 9-1	Dodaná energia do objektu pre jednotlivé systémy za rok	53
Tab. 9-2	Celková ročná spotrebovaná energia objektu	54
Tab. 9-3	Základné technické informácie distribučnej a rozvodnej sústavy	55
Tab. 9-4	Prehľad potrebných plôch pre inštaláciu fotovoltického systému	55
Tab. 9-5	Základný prehľad simulovaných fotovoltických systémov	56

Tab. 9-6	Technické údaje regulátoru nabíjania TriStar MPPT-60	58
Tab. 9-7	Parametre hybridného striedača Studer Innotec XTM 4000-48	58
Tab. 9-8	Technické údaje solárneho gélového akumulátora FG12-100DG	59
Tab. 9-9	Parametre FV panelu SunWays SM230MD1A	59
Tab. 9-10	Energetická bilancia navrhnutého hybridného systému v jednotlivých mesiacoch roka	60
Tab. 9-11	Energetická bilancia porovnávaného on – grid systému v jednotlivých mesiacoch roka	62
Tab. 9-12	Popis označených prvkov hybridného systému pre obr. 9–18.	65
Tab. 10-1	Celkový prehľad nákladov a výnosov pre hybrid a on-grid systém	66
Tab. 10-2	Rozpočet investičných nákladov pre hybridný FV systém ^a	66
Tab. 10-3	Ročné výnosy pre hybridný systém ^a	67
Tab. 10-4	Rozpočet investičných nákladov pre on-grid FV systém ^a	67
Tab. 10-5	Ročné výnosy pre on-grid systém ^a	67
Tab. 10-6	Ročné prevádzkové náklady pre hybridný a on-grid systém	67
Tab. 10-7	Prehľad peňažných tokov investície pre hybridný systém	68
Tab. 10-9	Spresňujúce parametre pre výpočet peňažných tokov	69
Tab. 10-10	Výsledky jednotlivých metód hodnotenia	69
Tab. 10-11	Vplyv produkcie energie na NPV, IRR a návratnosť pre hybridný systém ^b	71
Tab. 10-12	Vplyv zmeny ceny panelov na NPV, IRR a návratnosť pre hybridný systém ^b	72
Tab. 10-13	Vplyv zmeny ceny ^a silovej energie na NPV, IRR a návratnosť pre hybridný systém ^c	73
Tab. 10-14	Vplyv zmeny ceny ročných prevádzkových nákladov na NPV, IRR a návratnosť pre hybridný systém ^a	74

ZOZNAM SYMBOLOV

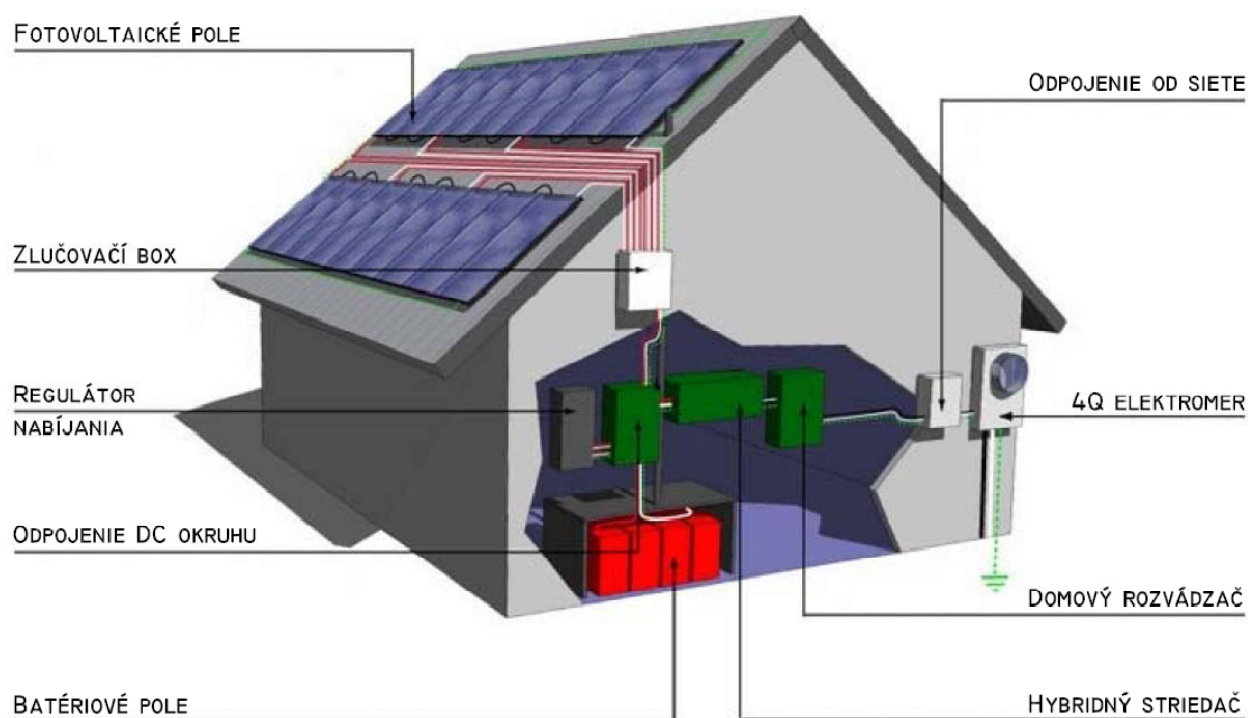
Značka	Veličina	Značka jednotky
AM	Air mass	-
FF	Fill Factor	%
I_{FLT}	Udržiavací nabíjací prúd	A
I_M	Multiplikačný prúd	A
I_{MAX}	Maximálny nabíjací prúd	A
I_{MIN}	Minimálne nabíjacie napätie	A
I_{NAB}	Nabíjací prúd	A
I_{SC}	Prúd nakrátko fotovoltaiického panelu	A
M_e	Vyžarovanie	W/m ²
P	Činný výkon	W
R_{SH}	Paralelný odpor	Ω
R_{S0}	Sériový odpor	Ω
S	Zdanlivý výkon	VA
U_M	Multiplikačné napätie	V
U_{OC}	Napätie naprázdno	V
V_{BLK}	Maximálne dovolené nabíjacie napätie	V
V_{MIN}	Minimálne nabíjacie napätie	V
$V_{MIN PRÍPOJNÉ}$	Minimálne prípojné napätie batérie	V
$V_{MIN PRÍPUSTNÉ}$	Minimálne prípustné napätie batérie	V
V_{FLT}	Udržiavacie nabíjacie napätie	V
t	Čas	s
η	Elektrická účinnosť	%
ω	Uhlová rýchlosť	rad.s ⁻¹

ZOZNAM SKRATIEK

AC	Alternate current
AGM	Absorbed glass material
CdTe	Cadmium telurid
CF	Cash flow
ČEZ	České energetické závody, a.s.
DC	Direct Current
DOD	Depth of discharge
EEF	Energy efficient
EN	European norm
ES	Európska smernica
FV	Fotovoltaika
EVA	Etyl vinyl acetát
FVE	Fotovoltaická elektrárň
GaAs	Gálium arzenid
HDO	Hromadné dialokové ovládanie
IEC	International electrotechnical commission
IEEE	Institute of electrical and electronics engineers
IGBT	Insulated gate bipolar tranzisto
IRR	Internal rate of return
MOSFET	Metal oxid semiconductor field effect tranzistor
MPPT	Maximum power point tracking
NiCd	Nikel cadmium
NiMH	Nikel metal hydrid
NN	Nízke napätie
NPV	Net present value
OZE	Obnoviteľný zdroj energie
P.A.	Per annum
PbA	Plumbum accumulator
PEM	Proton exchange membrane
PEN	Protect engrounded and neutral conductor
PVGIS	Photovoltaic geographical informattion system
SI	Silicium
SOC	State of charge
UPS	Uninterruptible power supply
VARLA	Valve regulated lead acid
VRB	Vanadium redox battery

1 ÚVOD

Pod pojmom hybridný fotovoltaický systém si môžeme predstaviť hybridnú fotovoltaickú elektrárňu druhej generácie, určenú pre rodinné domy, prípadne chaty, kde je k dispozícii štandardná elektrická prípojka. Ide v podstate o kombináciu klasickej FV elektrárne a ostrovného systému. Najväčšou výhodou pre systémy tohto typu do 30 kWp budovaných v súčasnosti, je nezávislosť na udeľovaní povolení pripojenia k distribučnej sústave.



Obr. 1-1 Znáznornenie on-grid systému s akumulacným prvkom [1].

Hybridný fotovoltaický systém teda môže už dnes vyrábať elektrinu z fotovoltaických panelov a v danom objekte ju efektívne spotrebúvať z vlastných zdrojov. Pri bežných fotovoltaických elektrárňach je využitých približne 30% z celkovej vyrobenej energie, teda 70% je dodávaných do siete za relatívne nevýhodných výkupných podmienok, ako ukazuje tabuľka 1-1.

Tab. 1-1 Počiatočné výkupné ceny pre FV systémy inštalované v danom roku [21]

Rok uvedenia do	Priamy výkup [kč / kWh]	Zelený bonus [kč / kWh]	Poznámka
< 2006	6.28	5.67	—
2006	13.20	12.59	—
2007	13.20	12.59	—
2008	13.46	12.65	—
2009	12.89	11.91	výkon do 30 kW
2010	12.25	11.28	výkon do 30 kW

Čerpanie zeleného bonusu je možné až po pripojení FV systému k distribučnej sústave, dôležitým aspektom je však jeho výška. Tá sa stanovuje na základe dátumu uvedenia systému do prevádzky. Investor tak nemusí zbytočne čakať na udelenie povolenia pripojenia do siete od distribútora, môže teda svoj FV hybridný systém okamžite používať. Systém síce nie je pripojený k distribučnej sústave, žiadnu elektrickú energiu do elektrizačnej sústavy nedodáva, zároveň sa ale vďaka pokročilej hybridnej technológii nejedná o čistú ostrovnú prevádzku. Po pripojení do siete, ktoré môže byť realizované neskôr, bude mať tento hybridný FV systém nárok na tzv. zelený bonus.

Ďalšia výhoda spočíva v integrovanej funkcii pre využitie prebytočnej energie vo výkonových špičkách, kedy inteligentný hybridný menič dokáže presmerovať prebytočnú vyrábanú energiu v reálnom čase, prípadne s riadeným oneskorením do vopred určených, energeticky náročných spotrebičov, ako sú napríklad bojler, tepelné čerpadlo, atď.

1.1 Legislatíva

Právne nariadenia platné pre výrobcov elektrickej energie z obnoviteľných zdrojov (OZE) sa v plnom znení nachádzajú na stránkach Energetického regulačného úradu. Prehľad zákonov týkajúcich sa tejto problematiky je v tabuľke 1–2. [30]

Tab. 1-2 Prehľad zákonov týkajúcich sa výrobcov elektrickej energie z OZE

Zákon č. 458/2000 Zb.	Energetický zákon (v znení neskorších predpisov)
Zákon č. 180/2005 Zb.	Zákon o podpore využívania obnoviteľných zdrojov (implementácia Európskej smernice 77/2001/ES)
Vyhláška 51/2006 Zb.	Zaoberá sa podmienkami možnosti pripojenia k elektrizačnej sústave
Vyhláška ERÚ č. 475/2005 Zb.	Upravujú sa ňou niektoré ustanovenia zákona o podpore a využívaní obnoviteľných zdrojov v platnom znení
Vyhláška ERÚ č. 502/2005 Zb.	Zaoberá sa ustanovením spôsobu vykazovania množstva elektriny pri spoločnom spaľovaní biomasy a neobnoviteľného zdroja
Vyhláška ERÚ č. 541/2005 Zb.	Zaoberá sa pravidlami trhu s elektrinou a zásadami tvorby cien za činnosť operátora trhu (novelizovaná vyhláškou 552/2006 Zb.)
Vyhláška ERÚ č. 150/2007 Zb.	Zaoberá sa spôsobom regulácie cien v energetických odvetviach a postupmi pre reguláciu cien
Vyhláška 393/2007 Zb.	Zaoberá sa hospodárením s energiou, jej novely sú vo vyhláške 61/2008 Zb.
Vyhláška 343/2008 Zb.	Ustanovuje vzor žiadosti o vydanie záruky o pôvode elektriny z OZE a vzor záruky o pôvode elektriny z OZE
Cenové rozhodnutie ERÚ	Ustanovuje výkupné ceny a zelené bonusy pre aktuálny rok

Pre pripájanie fotovoltaiického systému do distribučnej siete je nutné mať uzatvorenú zmluvu s prevádzkovateľom príslušnej distribučnej siete (ČEZ, E-on, PRE). Ten má povinnosť, na základe zákona č. 180/2005 Zb. o obnoviteľných zdrojoch, vykúpiť vyprodukovanú elektrinu v celej miere. Zmluva sa uzatvára na obdobie dvadsiatich rokov, čo znamená, že sa energetická spoločnosť zaväzuje vykupovať vyprodukovanú energiu vyrobenú z fotovoltaiického systému počas obdobia dvadsiatich rokov. K ďalším podmienkam patrí nahlásenie spôsobu podpory výroby z OZE najneskôr mesiac pred začatím výroby. Od výrobcu sa požaduje, aby každý mesiac vykazoval prevádzkovateľovi distribučnej či prenosovej sústavy, koľko elektriny vyprodukoval. V neposlednom rade musíme brať do úvahy fakt, že fotovoltaiické systémy sú z hľadiska stavebného zákona brané ako stavebné systémy, aj pokiaľ sú primontované na strechu dodatočne, je nutné mať náležité povolenia stanovené zákonom č.183/2006 Zb. týkajúce sa stavebného zákona a súvisiacich predpisov [20].

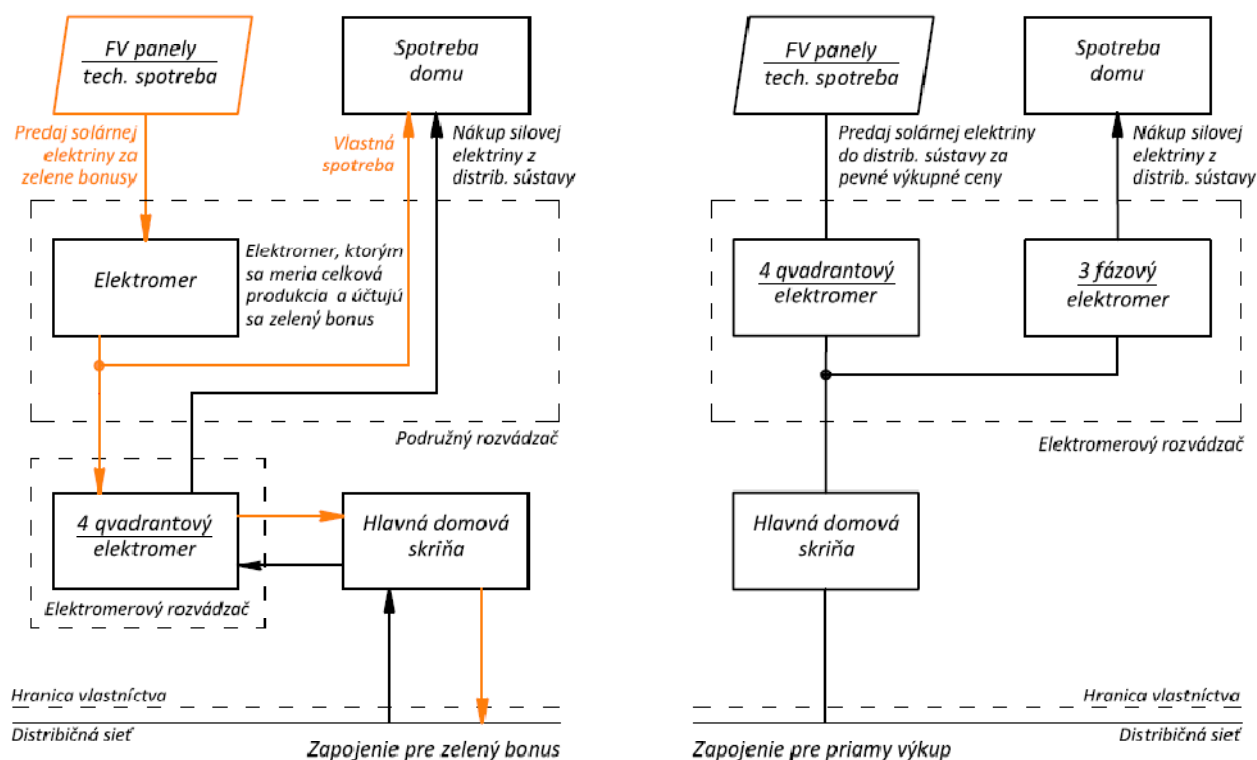
Zákon č. 180/2005 Zb. o podpore využívania obnoviteľných zdrojov zaisťuje určitý spôsob podpory výroby elektrickej energie z obnoviteľných zdrojov. Cieľom zákona je podpora využitia OZE, zaistiť zvyšovanie podielu OZE na výrobe elektrickej energie, podporiť myšlienku trvale udržateľného rozvoja a v neposlednom rade zvýšiť pravdepodobnosť splnenia vytýčeného cieľa. Zákon je okrem iného založený na nasledujúcich princípoch [20]:

- Povinnosť prevádzkovateľa siete pripojiť zariadenie pre distribúciu elektriny z OZE.
- Povinnosť vykupovať celkovú vyprodukovanú elektrinu z OZE, na ktorú sa vzťahuje podpora, a uzavrieť zmluvu o dodávke. Pokiaľ je prejavená vôľa zo strany výrobcu, súčasťou povinnosti prevádzkovateľa prenosovej siete alebo distribučnej sústavy, je zodpovednosť za odchýlky spôsobené prevádzkovateľom zdroja OZE.
- Dodatočné náklady spojené s odchýlkami výkonu zariadení OZE sú uznanými nákladmi pre výpočet cien za distribúciu a prenos.
- Dva nezávislé systémy podpory. Pevná výkupná cena alebo zelený bonus.
- Každoročné stanovenie výšky výkupných cien a zelených bonusov.
- Garancia výkupných cien pre dlhšie časové obdobie.
- Garantovaná návratnosť investície.

Pevná výkupná cena a zelený bonus sú hlavné finančné nástroje zákona 180/2005 Zb. V prípade, že sa rozhodneme využiť možnosť priameho predaja do siete, tak celá vyprodukovaná elektrická energia je dodávaná priamo do rozvodnej siete. Elektrickú energiu pre vlastnú spotrebu užívateľ nakupuje späť v rámci zvoleného tarifu. V prípade zeleného bonusu užívateľ spotrebovávajú energiu pre vlastné užitie, vzniknuté prebytky elektrickej energie sú automaticky dodávané do rozvodnej siete za cenu rozdielu výkupnej ceny a zeleného bonusu. Zelený bonus je teda forma odmeny pre užívateľa, že nespotrebovávajú elektrickú energiu dodávanú elektrickou spoločnosťou, ale spotrebovávajú svoju vlastnú. Na Obr. 1–2 sú blokové schémy zapojenia pre obe spomínané varianty. Je dobré si uvedomiť, že výrobou a predajom elektrickej energie niektorému z prevádzkovateľov distribučnej siete sa v istom slova zmysle stáva podnikateľom. Energetický regulačný úrad mu prideluje identifikačné číslo a príjem z predmetu elektriny je predmetom zdanenia.

Tab. 1-3 Výkupné ceny a zelené bonusy týkajúce sa FV systémov do 30kW [21]

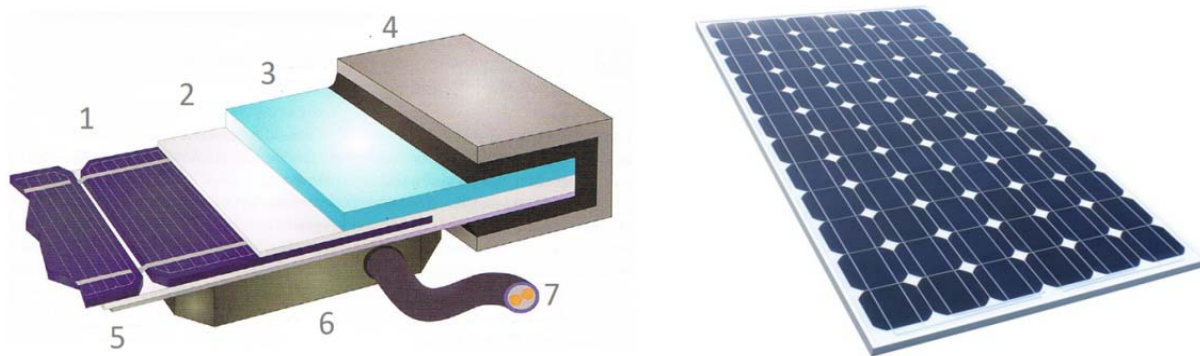
Dátum uvedenia do prevádzky	Priamy výkup [Kč/kWh]	Zelený bonus	Rozdiel [Kč/kWh]
1.1.2012 – 31.12.2012	6,160	5,08	1,08
1.1.2011 – 31.12.2011	7,65	6,57	1,08



obr. 1-2 Bloková schéma zapojenia pre zelený bonus a priamy výkup [2].

2 FOTOVOLTAICKÝ PANEL

Štandardný fotovoltaický panel, zobrazený na obr. 2–1, pozostáva z jednotlivých fotovoltaických článkov, ktoré bývajú sériovo paralelne zapojené z dôvodu získania prakticky použiteľného napätia. Rôznym spracovaním kremíku, v súčasnosti najviac rozšíreného vo fotovoltaických paneloch, je možné vyrobiť monokryštalické, polykryštalické a amorfné články. Monokryštalické a polykryštalické kremíkové moduly sú v dnešnej dobe komerčne najpoužívannejšie aj navzdory vyšším vstupným nákladom. Monokryštalický článok má tvar tmavého osemuholníka a väčšiu účinnosť ako polykryštalický článok. Vzhľadom k ich tvaru nie je celkové využitie plochy také dokonalé, ako je zjavné z obr. 2–1. Polykryštalický článok je sfarbený domodra v tvare štvorca, má o niečo nižšiu účinnosť ako monokryštalický článok. Napätie na jednom článku je definované použitým polovodičom. Pre kremík je to približne 0,5 V. Maximálny výkon panelu rastie s veľkosťou ožiarenej plochy. Hodnota nominálneho výkonu, uvádzaná výrobcom, býva určovaná pri takzvaných štandardných testovacích podmienkach. Vo väčšine prípadov sú tieto hodnoty 1000 W/m^2 , znečistenie vzduchu 1,5 a teplota na článku 25°C .



Obr. 2-1 Pohľad na fotovoltaický panel a jeho jednotlivé súčasti [3].

1 – FV články 2 – EVA fólia 3 – Solárne tvrdené sklo

4 – Hliníkový rám 5 – Tedlarova doska 6 – modulárny spojovací rám

7 – Pripojovací kábel

Tab. 2-1 Hodnoty účinnosti pre jednotlivé typy technológií FV článkov pri 1000 W/m^2 , 25°C a $\text{AM} = 1,5$

Materiál	η^c [%]	V_{oc}^a [V]	I_{sc}^b [A]	Fill Factor [%]
Si (kryštalický)	$22,9 \pm 0,6$	5,60	3,97	80,3
Si (veľké kryštály)	$21,4 \pm 0,6$	66,1	6,29	78,4
Si (multikryštalické)	$17,8 \pm 0,4$	14,6	9,04	75,7
Si (tenkovrstvé polykryštalické)	$8,2 \pm 0,2$	25,0	0,32	68,0
GaAs (kryštalický)	$21,1 \pm 0,6$	31,2	1,98	71,1
CdTe	$12,8 \pm 0,4$	94,1	1,27	74,4

^a Maximálne napätie pri nulovom prúde

^b Maximálny prúd pri nulovom napätí

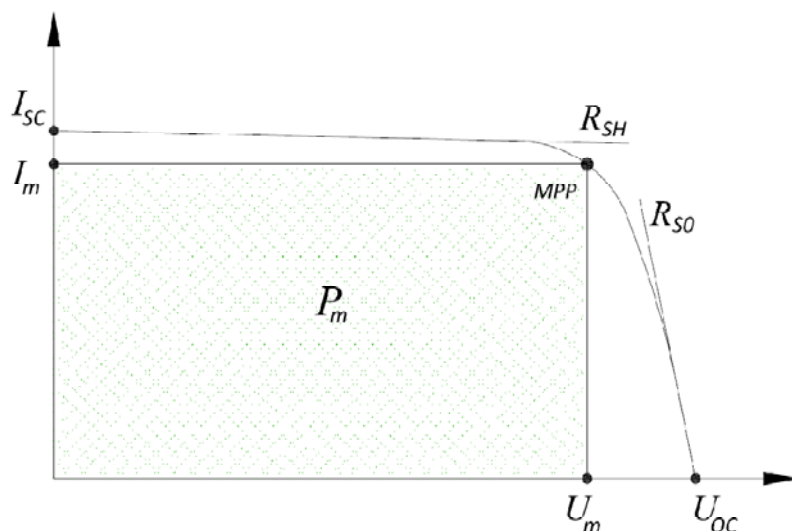
^c Účinnosť

Keďže je fotovoltaický panel náchylný na poškodenie, je nutné ho chrániť krytom. Na prednej strane panelu je tvrdené sklo. Tento druh skla je veľmi odolný proti nárazu a musí odolať extrémnym poveternostným podmienkam, ako sú napríklad krúpy. Na sklo sa následne ukladá plastová fólia z etylvinylacetátu (EVA), na ktorú sa skladajú spojené fotovoltaické články. Cez prepojené články sa opäť ukladá EVA fólia. Zadnú časť panelu tvorí spravidla laminátový kompozit. V ďalšom kroku sa vyčerpá vzduch medzi takto naskladanými vrstvami a panel sa zahreje nad teplotu tavenia EVA fólie. Tá sa roztečie a zaleje články medzi predným sklom a zadnou laminátovou stenou panelu. Nakoniec sa panel osadí do hliníkových profilov a zakryje škatuľou s výstupnými kontaktmi.

2.1 Elektrické parametre FV panela

Tab. 2-2 Prehľad základných elektrických parametrov FV panela

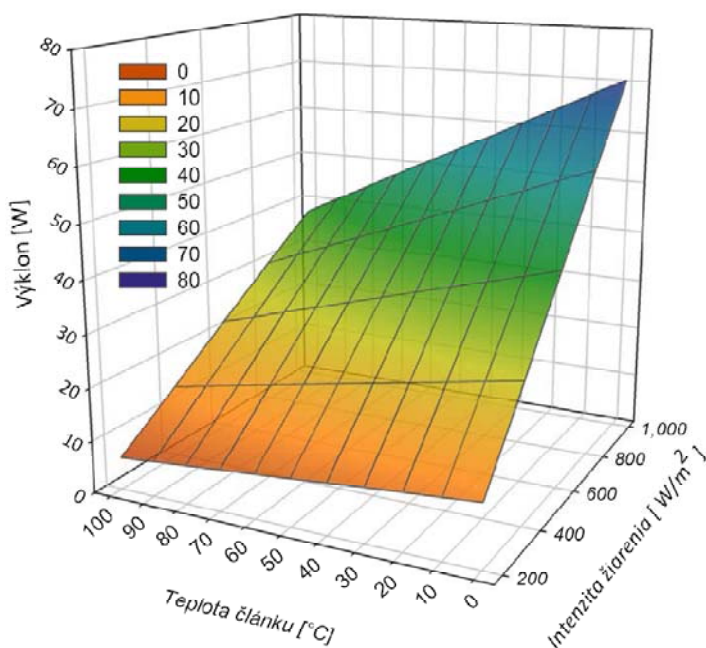
Prúd nakrátko	I_{SC}	Ide o prúd nakrátko, získaný pri $U = 0V$. Je to prúd generovaný svetlom za predpokladu, že sériový odpor R_{SO} je nulový. Vo svojej fyzikálnej podstate je to maximálny prúd, ktorý môže fotovoltaický panel pri danom ožiarení dodávať. Jeho veľkosť je závislá na intenzite ožiarenia, teplote a ožiarenej ploche.
Napätie naprázdno	U_{OC}	Napätie získané pri $I = 0$. Je to maximálne napätie článku pri danej teplote a intenzite ožiarenia.
Optimálny pracovný bod	MPP	Ide o bod na I-V charakteristike, v ktorom panel dodáva maximálny výkon P_m . Jeho hodnota je daná súčinom U_m a I_m
Činiteľ plnení	FF	Udáva pomer medzi maximálnym výkonom a výkonom daným napätím naprázdno a prúdom nakrátko. Je závislý na kvalite kontaktov, morfológii materiálu a odporu aktívnej polovodičovej vrstvy. Na základe hodnoty faktoru plnenia, ktorá je vždy menšia ako jedna, obyčajne 0,7 – 0,85 môžeme odhadnúť kvalitu panelu.
Účinnosť článku	η	Vyjadruje účinnosť premeny slnečného žiarenia dopadajúceho na fotovoltaický panel. Materiál, z ktorého je fotovoltaický článok vyrobený, ovplyvňuje spektrálnu citlivosť článku na dopadajúce žiarenie, teda článok využíva energiu rôznych vlnových dĺžok s rôznou účinnosťou. Účinnosť monokryštalických panelov sa pohybuje v rozmedzí 15 – 18 %.
Sériový odpor	R_{SO}	Pôvod sériového parazitného odporu je v celkovom odpore hmoty polovodiča, odporu kontaktov a pripojenia. Sklon charakteristiky (dotyčnice v bode I_{SC} zodpovedá parametru R_{SH}).
Paralelný odpor	R_{SH}	Veľkosť paralelného odporu je závislá na rozsahu defektov kryštalickej mriežky, prípadne zvodovými prúdmi v okolí okrajov článku. Sklon dotyčnice v bode U_{OC} zodpovedá parametru R_{SO} .



Obr. 2-2 Ampér-voltová charakteristika FV panelu s vyznačenými základnými parametrami [4]

2.2 Teplotná závislosť FV panelu

Fotovoltaický panel býva vystavený teplotným zmenám vo veľmi širokom rozpätí, preto je veľmi dôležité porozumieť významu teploty na celkový výkon panelu. Na polohu optimálneho pracovného bodu má teplota výrazný vplyv. Pri dlhšie trvajúcom intenzívnom slnečnom ožiarení alebo zhoršených podmienkach chladenia (bezvetrie), dochádza k zvýšeniu povrchovej teploty článku až na 80 °C. Pri takto vysokých teplotách dochádza k zmene elektrických vlastností. [4]



Tab. 2-3 Typické hodnoty^a pre MSX-64

Maximálny výkon P_m	64 W
Multiplikačné napätie U_m	17,5 V
Multiplikačný prúd I_m	3,66 A
Prúd nakrátko I_{sc}	4 A
Napätie naprázdno U_{oc}	21,3 V

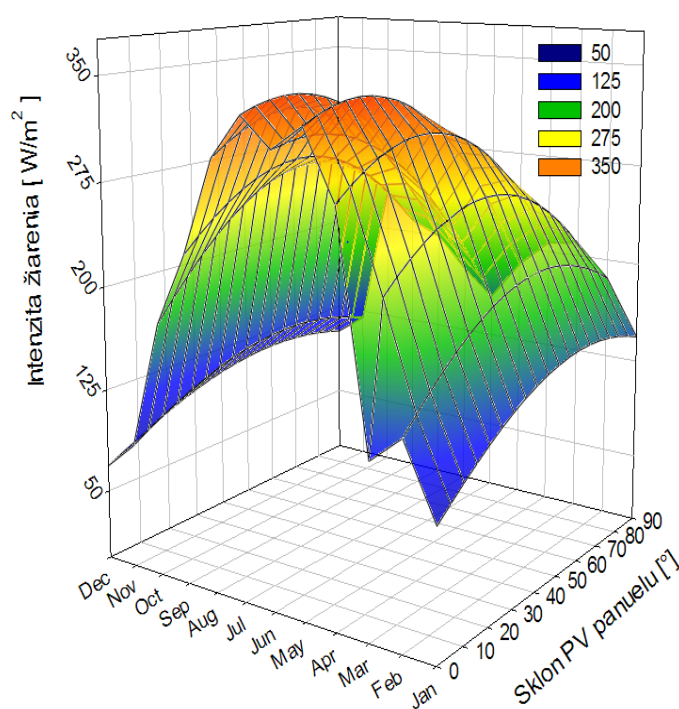
^a hodnoty pri 1000 W/m² a teplote 25 °C

Obr. 2-3 Graf výkonu FV panelu MSX-64 ako funkcia intenzity ožiarenia a teploty

Prúd nakrátko I_{sc} sa vplyvom teploty mení len nepatrne. To môže byť spôsobované zvýšenou svetelnou absorpciou, keďže sa šírka zakázaného pásma u polovodičov znižuje s poklesom teploty. Hodnota činiteľa plnenia sa s vzrastajúcou teplotou lineárne znižuje o približne $0,2 \% / ^\circ\text{C}$, hodnota sériového odporu R_{S0} sa so stúpajúcou teplotou zvyšuje približne lineárne o cca $0,32 \% / ^\circ\text{C}$ a pre hodnotu paralelného odporu R_{SH} platí, že so stúpajúcou teplotou sa jeho hodnota znižuje o $0,7 \% / ^\circ\text{C}$. Dominantnou premennou je U_{0C} , ktorá spôsobuje pokles výstupného výkonu a účinnosti s rastúcou teplotou. Vypočítanie výkonu, vzhľadom na zmenu teploty a intenzity žiarenia, znázorňuje obr. 2–3. Vstupné parametre boli numericky spočítané na základe rovníc uvedených v [12]. Vidíme, že dochádza k lineárnemu poklesu účinnosti o približne $0,5 \%$ na jeden stupeň pri ožiarení 1000 W/m^2 . Pre kremík je teoretický pokles výstupného výkonu o $0,4 - 0,5 \%$ na 1K , čo približne zodpovedá spočítaným hodnotám. Táto závislosť sa znižuje pre fotovoltaičné články so širokým zakázaným pásmom. Odhadované straty v dôsledku teploty sú približne $2,6 \%$. [4]

2.3 Vplyv orientácie na výkon FV panela

Výslednú intenzitu žiarenia dopadajúceho na povrch PV panelu určuje jeho orientácia vzhľadom na dopadajúce slnečné žiarenie. Uhol sklonu (medzi rovinou FV modulu a horizontom) a azimut (medzi vertikálnou rovinou prechádzajúcou FV modulom a rovinou daného poludníka) sú dva hlavné parametre určujúce výslednú orientáciu. Optimálna orientácia závisí od zemepisnej šírky uvažovaného miesta, prevažujúcich poveternostných podmienkach a podielu difúzneho žiarenia. Ďalší z významných faktorov vzťahujúcich sa k ideálnej orientácii je ročné obdobie. Ako vidíme v tab. 2–4 v zimných mesiacoch sa pohybuje optimálny sklon okolo 60° , v letných mesiacoch je optimum $18 - 20^\circ$.



Tab. 2-4 Hodnoty maxim pre obr. 2–4

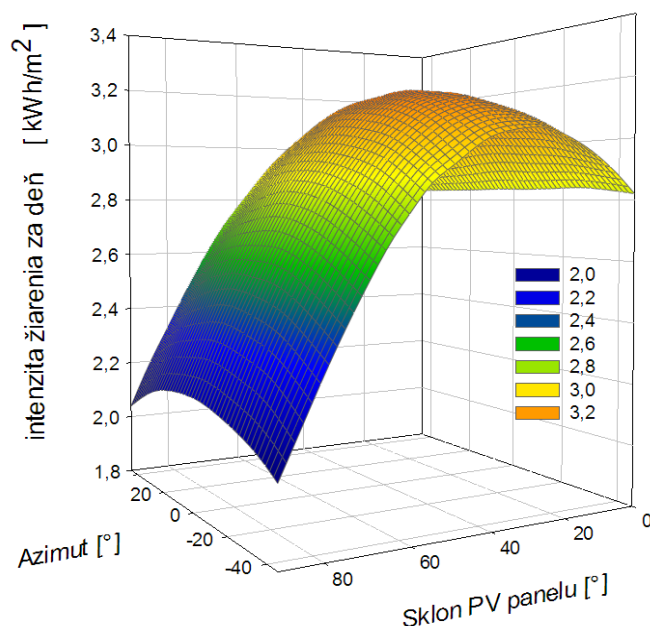
Mesiac	Optimálny uhol ^a [°]	Vyžarovanie [W/m ²]
Január	64	156,3
Február	57	212,1
Marec	45	267,3
Apríl	32	313,8
Máj	20	341,4
Jún	12	315,7
Júl	16	340,3
August	27	325,5
September	41	282,1
Október	55	269,9
November	58	133,7
December	63	112,5

^a hodnoty pri azimute 0°

Obr. 2-4 Graf intenzity dopadajúceho slnečného žiarenia ako funkcie sklonu PV panelu a mesiaca v roku.

Hodnoty pre graf na obr. 2–4 boli získané pomocou fotovoltaického informačného systému PVGIS. Daný informačný systém bol vytvorený výskumným centrom Európskej komisie. Je zameraný priamo na využitie pre fotovoltaické aplikácie, umožňuje kalkuláciu výroby elektriny v konkrétnom mieste po celej Európe a Afrike. Je k dispozícii on–line a zdarma. Systém využíva tak údaje z pozemných meteostaníc, tak aj satelitné merania. Hodnoty z tab.2–4 a 2–5 sú platné pre polohu $50^{\circ} 3'43''$ severnej zemepisnej šírky, $14^{\circ} 37'44''$ východnej zemepisnej dĺžky, pri nadmorskej výške 279 m, čo približne zodpovedá lokalite Praha Ďáblice. Dôvodom pre skúmanie danej lokality je návrh hybridného systému pre rodinný dom v praktickej časti práce.

Keďže v priebehu celého roka sa optimálny uhol výrazne mení, je nutné určiť konštantný sklon poskytujúci najvyššiu hodnotu dopadajúcej intenzity žiarenia. Obrázok 2–5 ukazuje zmenu priemernej ročnej hodnoty intenzity žiarenia vzťahnutej na deň, v závislosti na nastavovanej elevácii a azimute. Ukazuje sa, že najvyššia hodnota bola dosiahnutá pri náklone 34° a azimute 0° , čomu zodpovedá intenzita žiarenia $3,18 \text{ kWh/m}^2$ za deň. Pri menšom náklone, približne $15 - 20^{\circ}$ je strata približne do 2 %, čo je ešte prípustná miera.



Tab. 2-5 Hodnoty maxim pre obr. 2–5

Azimut [°]	Uhol [°]	Maximálna hodnota [kWh/m ²]
-45	25 – 30	3.02
-30	30 – 35	3.11
-15	30 – 35	3.16
0 ^a	35	3.18
15	30 – 35	3.16
30	30 – 35	3.12
45	25 – 30	3.04

^a Azimut 0° zodpovedá orientácii na juh

Obr. 2-5 Graf intenzity priemerného ročného slnečného žiarenia vzťahnutého na deň ako funkcia sklonu PV panelu a azimutu.

Posledným aspektom, ktorý je nutné zvážiť pri rozhodovaní o konečnej orientácii je začlenenie do nosnej konštrukcie. Pri aplikáciách integrovaných do fasád, prípadne na strešné krytiny, je uhol daný povahou konštrukcie. Teda na úkor estetického vzhľadu sa odkloníme od optimálnej orientácie.

3 SÚČASNÉ AKUMULAČNÉ TRENDY VO FV APLIKÁCIÁCH

Optimálny akumulčný prvok musí vyhovieť nasledujúcim kritériám, ktoré sú charakteristické pre FV aplikácie. Ide hlavne o nízku hodnotu samovybíjania, minimálne, resp. nulové požiadavky na údržbu po celú dobu životnosti, vysokú nabíjaciú účinnosť, širokú prevádzkovú teplotu, vysokú koncentráciu energie na jednotku objemu, resp. hmotnosti, bezpečnosť, schopnosť nasadenia v akejkoľvek pozícii a možnosť dlhodobého odstavenia vo vybitom stave. Samozrejme, nie sme schopní skombinovať všetky požadované kritéria, z tohto dôvodu hľadáme akumulčný variant, ktorý bude optimalizovaný práve pre konkrétnu aplikáciu. Existuje niekoľko komerčne dosiahnuteľných alternatív, ktoré spĺňajú tzv. kritické požiadavky na bezpečnosť, bezúdržbovosť a cenu.

3.1 NiCd akumulátory

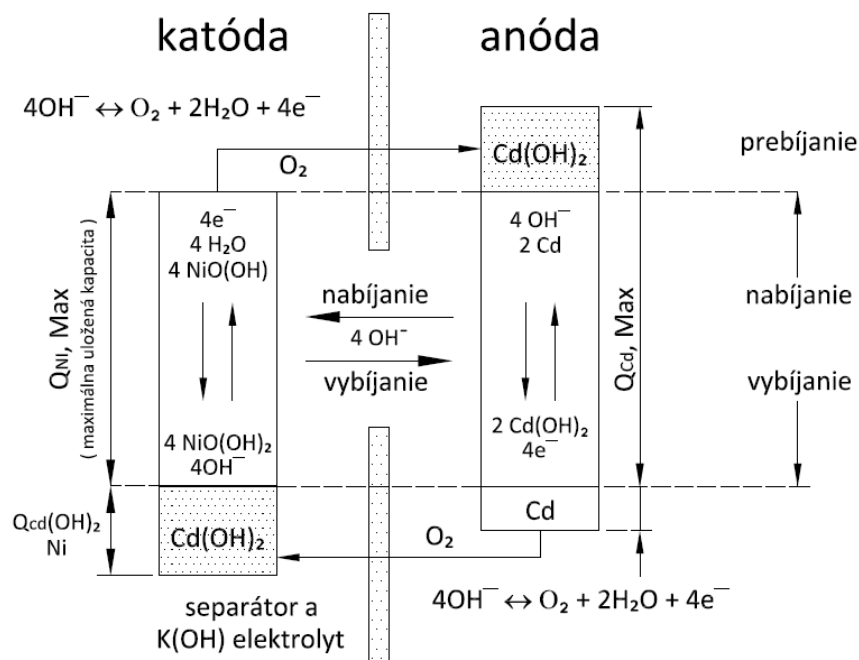
Akumulátory tohto typu sa vyznačujú osvedčenou spoľahlivosťou za extrémnych prevádzkových stavov, vysokou hustotou energie na jednotku hmotnosti, resp. objemu (100Wh / dm³), dobrou toleranciou na prebíjanie i prepólovanie, malým samovybíjaním a odolnosťou voči zvýšeným teplotám. Životnosť sa pohybuje na úrovni 500 cyklov nabitia / vybitia pri 80 % hĺbke vybitia. Na druhej sú strane NiCd akumulátory približne 7x drahšie ako porovnateľné olovené batérie (cca 700 €/kWh). Batérie sú taktiež náchylné na pamäťový efekt. [26]

3.1.1 Elektrochemické reakcie pri nabíjaní a vybíjaní NiCd akumulátorov

V nabitom stave kladná elektróda obsahuje oxid – hydroxid nikelnatý NiO(OH) a záporná elektróda je tvorená kadmiovým Cd. Aktívnou zložkou kladnej elektródy vo vybitom stave je hydroxid nikelnatý Ni(OH)₂, záporná elektróda pozostáva z hydroxidu kademnatého Cd(OH)₂. Počas vybíjania sa trojmocný hydratovaný oxid nikelnatý redukuje na dvojmocný oxid nikelnatý a kadmium u zápornej elektródy je oxidované na hydroxid kademnatý. Procesy prebiehajúce pri nabíjaní platia nasledujúce vzťahy, pri vybíjaní prebiehajú naznačené chemické reakcie opačným smerom.

Tab. 3-1 Chemické procesy prebiehajúce na elektródach NiCd článku pri nabíjaní a vybíjaní

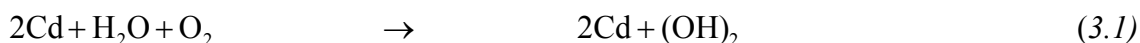
Celková reakcia	Nabíjanie Vybíjanie	$\text{Cd(OH)}_2 + 2\text{Ni(OH)}_2 \rightarrow \text{Cd} + 2\text{NiO(OH)} + 2\text{H}_2\text{O}$ $\text{Cd} + 2\text{NiO(OH)} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Cd(OH)}_2 + 2\text{Ni(OH)}_2$
Na kladnej elektróde	Nabíjanie Vybíjanie	$2\text{Ni(OH)}_2 + 2\text{OH}^- \rightarrow 2\text{Ni(OH)} + 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$ $2\text{Ni(OH)} + 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{Ni(OH)}_2 + 2\text{OH}^-$
Na zápornej elektróde	Nabíjanie Vybíjanie	$\text{Cd(OH)}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cd} + 2\text{OH}^-$ $\text{Cd} + 2\text{OH}^- \rightarrow \text{Cd(OH)}_2 + 2\text{e}^-$



Obr. 3-1 Schematické znázornenie chemických reakcií pre NiCd technológiu.

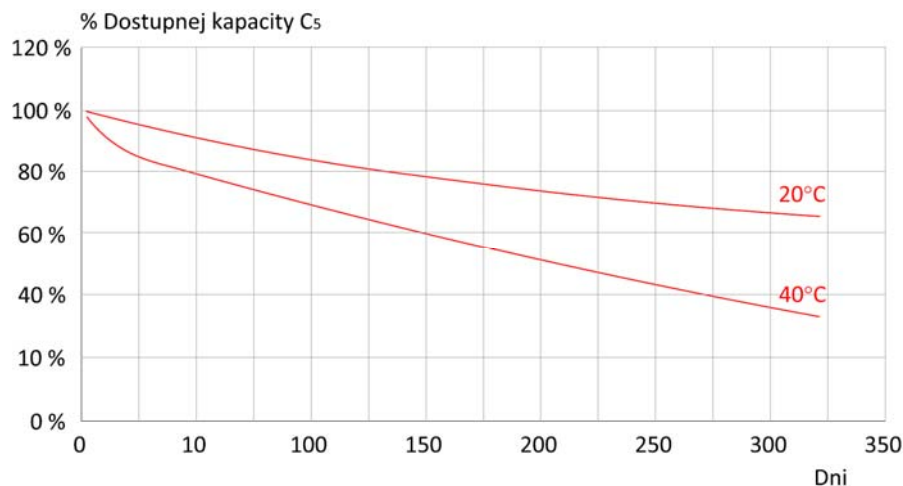
Pokiaľ nabíjanie pokračuje i po plnom nabití, dochádza k tzv. prebíjaniu. Ide o dej, pri ktorom sa začína rozkladať elektrolyt, dochádza k elektrolyze vody obsiahnutej v elektrolyte. Dôsledkom je vývoj kyslíka na kladnej elektróde a vodíka na zápornej. V prípade otvorených akumulátorov sú takto vznikajúce plyny odvádzané do okolitej atmosféry. V hermetických akumulátoroch sa využíva schopnosť zápornej elektródy viazať kyslík uvoľňujúci sa na kladnej elektróde pri prebíjaní, v tomto prípade hovoríme o rekombinácii.

Chemický dej prebiehajúci pri prebíjaní:



Výsledným dejom je stav, kedy kyslík uvoľnený pri prebíjaní na kladnej elektróde je viazaný na elektródu zápornú. Pritom je kovové kadmium vznikajúce ako produkt nabíjania zápornej elektródy oxidované na Cd(OH)_2 , čím je zabránené plnému nabití a následnému prebíjaniu.

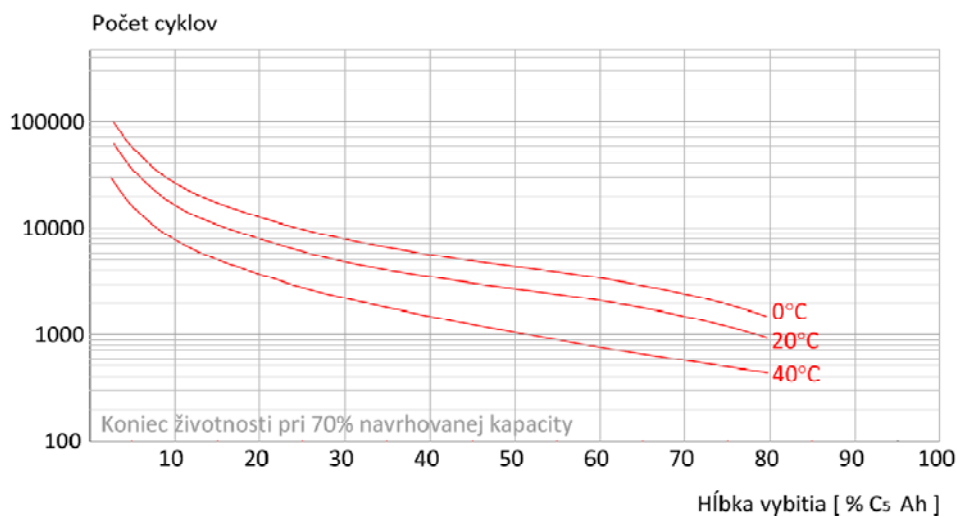
NiCd články, ako každé iné články, majú určitú tendenciu samovybíjania. Pre uvažovaný typ článku výrobca uvádza 15 – 20 % kapacity za mesiac. Táto miera svojvoľného vybíjania je definovaná chemickými procesmi odohrávajúcimi sa v akumulátore. Hydroxid nikelnatý je relatívne nestabilný, má tendenciu o prechod do pôvodného stavu. Ďalší faktor samovybíjania je určité percento znečisťujúcich častíc, ktoré obsahuje elektrolyt. Tie svojou prítomnosťou urýchľujú spätnú väzbu a tým aj samovybíjanie.



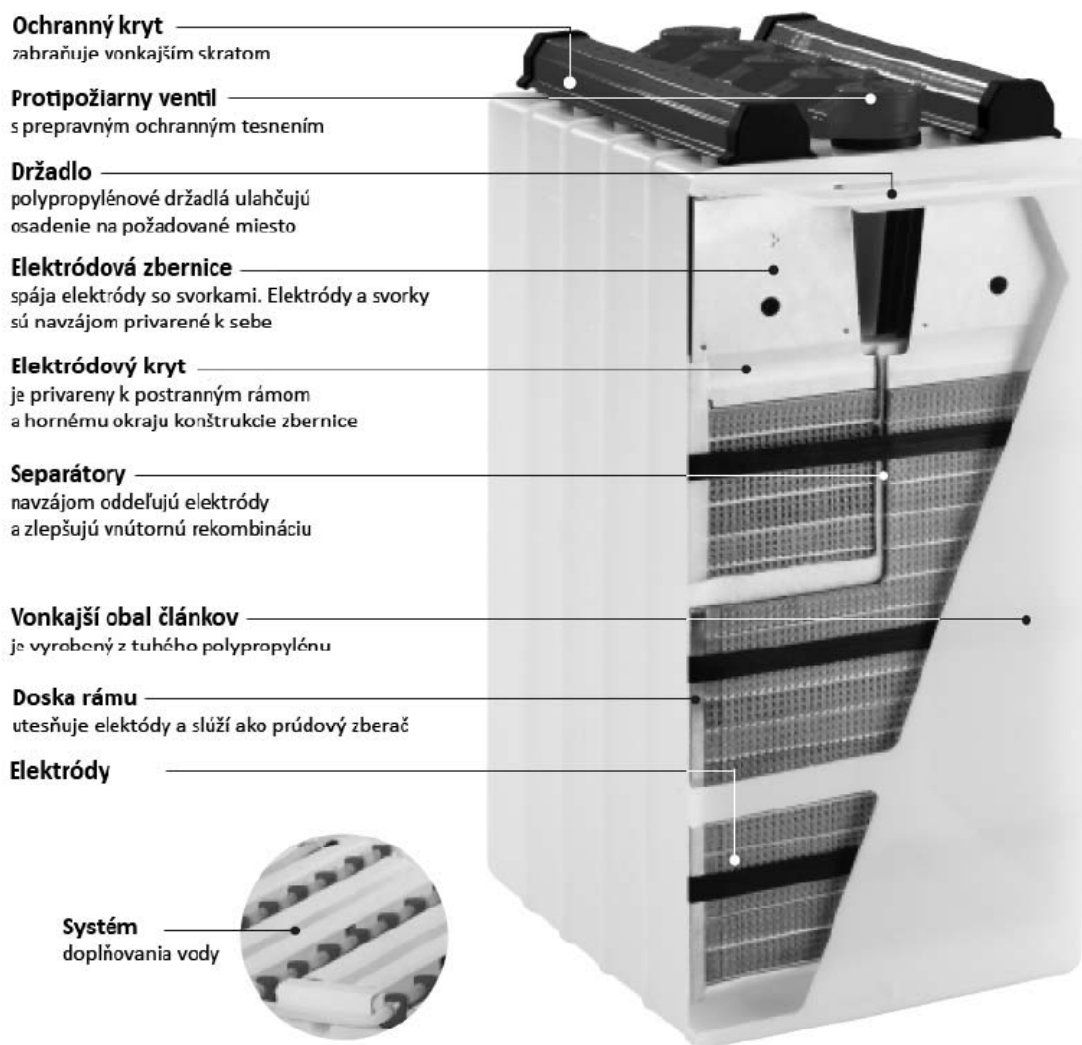
Obr. 3-2 Graf samovybijania pre teploty 20° a 40° NiCd akumulátora SUNICA plus [5].

NiCd akumulátory, určené pre fotovoltaické on/off grid systémy, sú navrhované tak, aby vydržali široké spektrum cyklov, od nízkej hĺbky vybitia, až po 100 % vybitie. To, ako dlho bude batéria schopná udržať energiu, je závislé hlavne od počtu cyklov a hĺbky vybitia. Čím menšia je hĺbka vybitia, tým väčší počet cyklov je batéria schopná dosiahnuť pri zachovaní minimálnej navrhovanej konštrukčnej kapacity. Z grafu vidíme, že napríklad pri 10 % hĺbke vybitia je batéria schopná dosiahnuť približne 10 000 cyklov, zatiaľ čo pri hodnote 20 % je to len 1000 cyklov [26].

V praxi, vo fotovoltaických aplikáciách, sú batérie vystavené veľkému počtu relatívne plytkých cyklov nabíjanie – vybíjanie, ktoré prebiehajú v rôznych stavoch nabitia, v ktorých sa akumulátor práve nachádza. Nabíjanie prebieha pri rôznych teplotách, v rôznych fázach dňa, resp. teplota, pri ktorej sa článok nabíja, nie je vždy konštantná. Tieto aspekty sa snaží simulovať štandard 61427, ktorý v sebe spája všeobecné požiadavky a skúšobné metódy, ktoré by mal spĺňať každý akumulčný člen nasadený vo fotovoltaických aplikáciách [26].



Obr. 3-3 Graf závislosti cyklov na hĺbke vybitia pri teplotách 0°, 20° a 40° pre NiCd akumulátor Sunica plus [5]



Obr. 3-4 NiCd akumulátor SUNICA plus [5]

Obrázok 3–4 zobrazuje zaplavenú konštrukciu s doplňovacím systémom vody, bez rekombinácie plynov vznikajúcich pri nabíjaní. Aktívne zložky batérie s lisovanými doskami elektród sú umiestnené v kapsách vytvarovaných z oceľových perforovaných pásov. Tieto kapsy sú mechanicky spojené, orezané na veľkosť, ktorá zodpovedá šírke dosky a zlisované do konečného rozmeru dosky. Toto opatrenie zaisťuje požadovanú mechanickú pevnosť dosky. Oceľové zapuzdrenie aktívnej časti zväčšuje výslednú vodivosť dosky a minimalizuje nežiaduce zväčšovanie elektród. Dosky sú následne privarené, prípadne priskrutkované k vodivej zostave zbernice, čo zabezpečuje mechanickú a elektrickú stabilitu výsledného akumulátora.

NiCd články majú pomerne dlhú životnosť a dosahujú vysokého počtu cyklov. Napríklad francúzska firma SAFT uvádza, že ich akumulátor SUNICA plus dosahuje až 8000 cyklov pri 15 % hĺbke vybitia. Elektródy nepodliehajú oslabovaniu koróziou, pretože konštrukčné dosky sú z ocele. Aktívna súčasť dosky nie je konštrukčná, ale len elektrická. Zásaditý elektrolyt s oceľou nereaguje, čo znamená, že nosná konštrukcia batérie zostáva nedotknutá, resp. nedochádza k chemickým zmenám po celú dobu jej životnosti. Dosky pri olovených batériách sú jednak konštrukčným, tak aj aktívnym materiálom, čo vedie k opotrebovaniu materiálu celej elektródy a prípadným deštruktívnym zmenám. [26]

3.2 NiMH akumulátory

Pôvodne ekologicky motivovaná snaha o odstránenie ťažkého a jedovatého kadmia viedla k podpore technológie NiMH, ktorá svojimi parametrami prekonala akumulátory NiCd. NiMH akumulátory boli uvedené na trh v relatívne nedávnej dobe. Ich parametre sa priebežne zlepšujú a je predpoklad, že ich negatívne vlastnosti sa budú v blízkej dobe postupne odstraňovať. U týchto typov sa s výhodou využíva skutočnosť, že je výrazne potlačený pamäťový efekt oproti Ni-Cd článkom. Vynikajú hlavne vyššou objemovou koncentráciou energie, typicky 300 Wh/dm^3 a životnosťou presahujúcou viac ako 500 cyklov nabitie / vybitie pri 80 % DOD. NiMH akumulátory majú síce podstatne vyššiu kapacitu a výkon na jednotku hmotnosti a objemu ako olovené akumulátory, ale cenovo sú výrazne drahšie až 1000 €/kWh , ich cena je približne 11x vyššia ako ekvivalentná olovená náhrada. Na takto vysokej cene sa podpísali prevažne použité zliatiny titánu a zirkónu, ktoré sa pri výrobe používajú [26].



Obr. 3-5 NiMH akumulátor firmy SAFT, typ NHE [6]

3.2.1 Elektrochemické reakcie pri nabíjaní a vybíjaní NiMH akumulátorov

Kladná elektróda NiMH akumulátorov má rovnakú konštrukciu a zloženie aktívnej hmoty ako kladná elektróda NiCd akumulátorov. To znamená, že elektrochemické zmeny prebiehajúce pri nabíjaní a vybíjaní sú zhodné. Záporná elektróda obsahuje ako elektrochemicky aktívnu látku kovovú zliatinu, ktorá je schopná behom nabíjania a vybíjania viazať a uvoľňovať vodík.

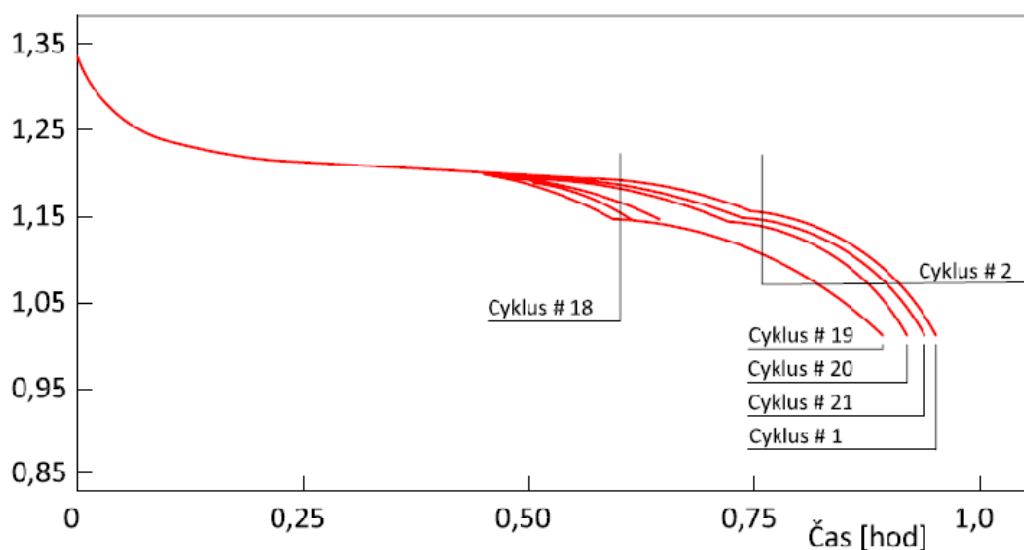
Tab. 3-2 Chemické procesy prebiehajúce na elektródach NiMH článku pri nabíjaní a vybíjaní

Celková reakcia	Nabíjanie Vybíjanie	$\text{Ni(OH)}_2 + \text{M} \rightarrow \text{Ni(OH)} + \text{MH}$ $\text{Ni(OH)} + \text{MH} \rightarrow \text{Ni(OH)}_2 + \text{M}$
Na kladnej elektróde	Nabíjanie Vybíjanie	$\text{Ni(OH)}_2 + \text{OH}^- \rightarrow \text{Ni(OH)} + \text{H}_2\text{O} + \text{e}^-$ $\text{Ni(OH)} + \text{H}_2\text{O} + \text{e}^- \rightarrow \text{Ni(OH)}_2 + \text{OH}^-$
Na zápornej elektróde	Nabíjanie Vybíjanie	$\text{M} + \text{H}_2\text{O} + \text{e}^- \rightarrow \text{MH} + \text{OH}^-$ $\text{MH} + \text{OH}^- \rightarrow \text{M} + \text{H}_2\text{O} + \text{e}^-$

3.2.2 Napät'ový pokles NiMH akumulátorov

Po prekonaní veľkého počtu cyklov dochádza k javu, ktorý má za následok postupné znižovanie kapacity NiMH článkov. Tento nepriaznivý jav môže byť urýchľovaný prebíjaním, zlým skladovaním, prevádzkovaním za vysokých teplôt, prípadne zlým párovaním článkov.

Krátka životnosť môže byť chybne spájaná stzv. pamäťovým efektom, ktorý je používaný ako synonymum pre napät'ový pokles. Napät'ový pokles je vedecky zmerateľná vlastnosť všetkých batérií. Vratný pokles napätia a kapacity sa môže vyskytnúť, keď sú batérie čiastočne vybité a opätovne znovu nabíjané bez plného vybitia.



Obr. 3-6 Vplyv čiastočného vybitia na kapacitu NiMH článku

Počas naznačených cyklov napätie a kapacita článkov pozvoľna klesala (cyklus 2 – cyklus 18). Pri úplnom vybití, ktoré prebehlo v cykle 19, je zjavný pokles napätia porovnateľný s cyklom 1. V článku môže byť rýchlo jeho pôvodná kapacita, a to po niekoľkých úplných cykloch nabitia – vybitia, ako naznačujú cykly 20 – 21. To, že dochádza k poklesu napätia je spôsobené tým, že pri neúplnom cykle prechádza len časť aktívneho materiálu v článku cyklickou zmenou. Materiál, ktorý neprešiel touto zmenou zvýšil svoj odpor. Následné úplné cykly nabíjania – vybíjania zapríčínajú návrat materiálu do pôvodného stavu.

Veľkosť napät'ového poklesu a úbytku kapacity je závislá od hĺbky vybitia a môžeme sa mu vyhnúť tým, že vybíjame batériu na vhodné konečné napätie. Napät'ový pokles sa najviac prejavuje, keď je vybíjanie prerušené na vysokom konečnom napätí 1,2 – 1,15V / článok. Vybíjanie na 1V / článok by nemalo spôsobovať podstatný napät'ový úbytok a stratu kapacity článku.

3.3 PbA akumulátory

Vďaka vhodným vlastnostiam a cenovej dostupnosti sa na celom svete vo fotovoltaických aplikáciách takmer výhradne používajú olovené akumulátory. Požívané akumulátory tohto prevedenia môžeme rozdeliť nasledovne:

Tab. 3-3 Rozdelenie PbA akumulátorov podľa použitej technológie

Popis použitej technológie	Popis
Zaplavová konštrukcia	Batéria pracuje s elektródami ponorenými do v elektrolyte, H_2 a O_2 uvoľnené behom prebiehania voľne unikajú do atmosféry. Jedná sa o autobatérie, staničné batérie atď.
VRLA ^a	Ventilom riadené olovené akumulátory sú navrhnuté na prácu v režime vnútorného kyslíkového cyklu. Existujú dva alternatívne návrhy transportu plynu vo VRLA ^a článkoch. AGM ^b – elektrolyt je nasiaknutý v sklenenej vate. Druhý variant transformuje elektrolyt do formy nepohyblivého gélu.

^a Valve Regulated Lead Acid

^b Absorbed Glass Mat

Olovené akumulátory tiež môžeme rozdeliť podľa typu elektród. Záporné elektródy sa v súčasnosti vyrábajú pre všetky typy štartovacích, trakčných a staničných akumulátorov, ako sú mriežkové, odlieváním, prípadne valcovaním z oloveného pásu. U kladných elektród rozoznávame dva typy, a to ploché a trubkové, niekedy nazývané ako pancierové [26].

Tab. 3-4 Základný prehľad elektród použitých v PbA akumulátoroch

Typ elektródy	Popis
Mriežková	Vyrábajú sa v rôznych hrúbkach. Tenšia než 2,5 mm majú menší vnútorný elektrický odpor a to ich predurčuje pre použitie v štartovacích batériách. Hrubšie elektródy majú vyššiu životnosť, používajú sa pri výrobe staničných batérií.
Trubková	Vyznačujú sa dlhou životnosťou pohybujúcou sa v rozmedzí 1000 – 1500 cyklov. Vzhľadom na vyšší elektrický odpor sa používajú pre staničné batérie.
Špirálové	Kladná a záporná mriežková elektróda sú spolu so separátorom stočené do špirály. To umožňuje udržať separátor pod vysokou kompresiou. Tým sa dosahuje vyššia životnosť, redukuje sa vnútorný odpor a zlepšuje sa výkon batérie. Tento typ sa používa pre štartovacie batérie

Najrozšírenejšie sú doskové olovené akumulátory so zaplavenou konštrukciou, automobilového typu. Cenovo sú jednoznačne najvýhodnejšie (50 €/kWh), toto je však vyvážené hustotou energie, ktorá sa pohybuje okolo 60 Wh/dm³. Vďaka tejto cene môžeme uvažovať o zaradení do akumulčného systému pre domáce fotovoltaické aplikácie. Vďaka životnosti, ktorá sa pohybuje okolo 0,5 – 3,5 roku (v závislosti od podmienok prevádzky), dochádza k postupnému narastaniu celkových nákladov, z dôvodu predpokladanej dĺžky prevádzky systému.

Trubkové akumulátory so zaplavenou konštrukciou majú vyššiu životnosť, v priemere 8 rokov pri 50 % hĺbke vybitia. Ich cena sa pohybuje okolo 140 €/kWh. Príkladom môže byť typ SEC-T-RANGE (obr. 3 – 7), ktorý ma garantovanú životnosť približne 1200 cyklov pri 80 % hĺbke vybitia v každom cykle [26].



Obr. 3-7 Olovené akumulátory firmy SEC modelová rada SEC-T-RANGE záplavovej konštrukcie [7]

Pri používaní olovených batérií záplavovej konštrukcie dochádza k nežiaducemu javu, kedy sa hromadí elektrolyt o vyššej koncentrácii na dne nádoby a následne na elektródach dochádza k vzniku kryštálov síranu olovnateho. Na rozdiel od pôvodného amorfného síranu sa vzniknuté kryštáliky zúčastňujú premeny aktívnej hmoty elektród len vo veľmi obmedzenej miere. Dochádza teda k zníženiu kapacity akumulátora. Ďalším nežiaducim dôsledkom sulfatácie je nárast vnútorného odporu, resp. zníženie vodivosti. Dochádza teda k zníženiu napätí a prúdu dodávaného akumulátorom. Obzvlášť pri veľkých prúdových odberoch. Tento problém sa rieši núteným pohybom elektrolytu, a to zariadením, ktoré mieša elektrolyt. Druhá možnosť predpokladá špeciálny postup nabíjania, kedy dochádza k vývinu plynov.

3.3.1 Elektrochemické reakcie pri nabíjaní a vybíjaní PbA akumulátorov

Pre výrobu elektród sa používa olovo legované vápnikom, aby sa znížila elektrolyza vody na kyslík a vodík. V nabitom stave tvorí aktívnu hmotu zápornej elektródy hubovité olovo Pb, v prípade kladnej elektródy je to oxid olovičitý (PbO_2). Ako elektrolyt je použitá vodou zriedená kyselina sírová (H_2SO_4) s približnou koncentráciou 35 % z celkového objemu, v prípade plne nabitého akumulátora. Tento roztok, v závislosti na technickom prevedení, môže byť nasiaknutý do sklenených vlákien (AGM), prípadne upravený do formy kremičitého gélu.

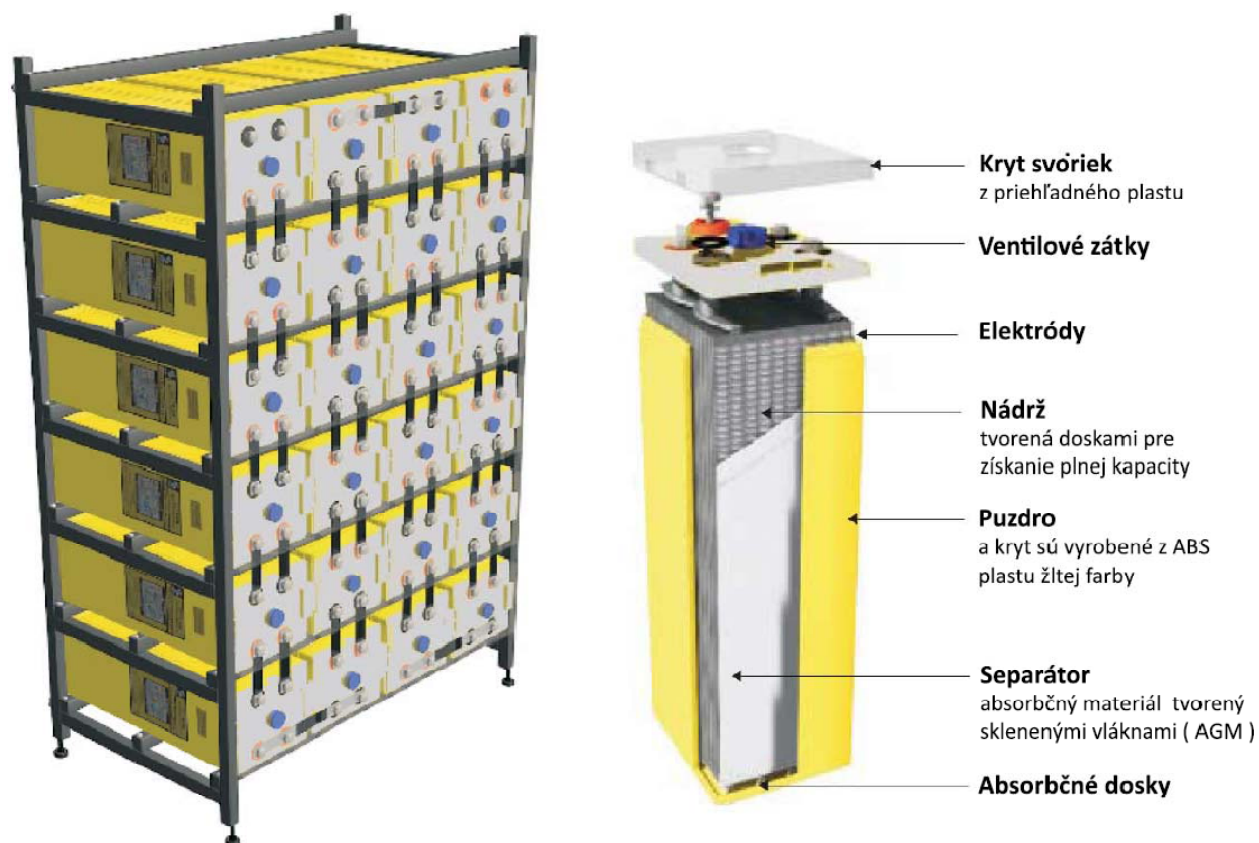
Tab. 3-5 Chemické procesy prebiehajúce na elektródach PbA článku pri nabíjaní a vybíjaní

Celková reakcia	Nabíjanie Vybíjanie	$2 \text{PbSO}_4 + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{PbO}_2 + \text{Pb} + 2 \text{H}_2\text{SO}_4$ $\text{PbO}_2 + \text{Pb} + 2 \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow 2 \text{PbSO}_4 + 2 \text{H}_2\text{O}$
Na kladnej elektróde	Nabíjanie Vybíjanie	$\text{PbSO}_4 + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{PbO}_2 + 4\text{H}^+ + \text{SO}_4^{2-} + 2\text{e}^-$ $\text{PbO}_2 + 4\text{H}^+ + \text{SO}_4^{2-} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{PbSO}_4 + 2 \text{H}_2\text{O}$
Na zápornej elektróde	Nabíjanie Vybíjanie	$\text{PbSO}_4 + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Pb} + \text{SO}_4^{2-}$ $\text{Pb} + \text{SO}_4^{2-} \rightarrow \text{PbSO}_4 + 2\text{e}^-$

Pri nabíjaní sa tvorí kyselina sírová H_2SO_4 a elektrolyt hustne. Po skončení nabíjania sa na kladnej elektróde usadzuje oxid olovičitý (PbO_2) červenohnedej farby. Záporná elektróda sa pokryje šedou pórovitou vrstvou olova. Na svorkách páru elektród môžeme zmerať napätie 2,1 [V]. Môžeme povedať, že hustota elektrolytu je spoľahlivou známkou stavu akumulátora. Pri vybíjaní prebieha opačná reakcia, elektrolyt redne, vytvára sa H_2O a na oboch elektródach sa usadzuje síran olovnatý (PbSO_4). Napätie článku by nemalo klesnúť pod 1,75 – 1,8 V.

VRLA akumulátory, či už s doskovým typom elektród typu AGM, prípadne gélovej konštrukcie, vykazujú stredne dlhú životnosť, približne 5 rokov. Ich cena sa pohybuje okolo 100 eur/kWh. AGM akumulátory, na rozdiel od gélových, vykazujú problémy s čiastočnou stratifikáciou. Prejavuje sa aj výskyt teplotného skratu. Pri teplotnom skrate dochádza ku generovaniu značného množstva kyslíka, ktorý sa exotermicky rekombinuje na anóde. Dôsledkom tohto javu je celkové vysušenie elektrolytu, nárast vnútorného odporu a porušenie tesnosti akumulátora, čo je nežiaduce. V extrémnych prípadoch môže dôjsť k roztaveniu olovených častí. Celkovo AGM akumulátory nie je možné používať za extrémnych teplotných podmienok, čo značne obmedzuje spektrum nasadenia pre tento typový rad. Tieto nepriaznivé aspekty AGM technológie spôsobili, že do popredia sa dostala gélová konštrukcia [26].

Akumulátory VRLA, ktoré používajú trubkovú konštrukciu elektród so znehybneným elektrolytom gélovej formy sú bezúdržbové po celú dobu svojej životnosti, ktorá je približne 8 – 10 rokov. Ich cena sa pohybuje okolo 200 € / kWh, čo má za následok, že batérie tohto typu sa nasadzujú do vysoko profesionálnych systémov, kde sa uprednostňuje spoľahlivosť a životnosť pred výškou nákladov. Hlavnou výhodou oproti AGM technológii je rozsah prevádzkových teplôt, ktoré umožňujú nabíjanie od -20°C . Fotovoltaické aplikácie sú typické nízkymi vybíjacími rýchlosťami, hlbokým vybíjaním a nepravidelným nabíjaním, pri ktorom nie vždy dochádza k plnému nabitíu. Týmto požiadavkám najviac vyhovuje posledná spomínaná, typový rad GEL-VRLA.



Obr. 3-8 Gélové olovené akumulátory firmy SEC, doskovej konštrukcie v regálovom uložení, vhodné na fotovoltaičné aplikácie [8]

4 POROVNANIE NiCd, NiMH A PbA TECHNOLOGIÍ

Tab. 4-1 Hodnoty korekčných faktorov životnosti pri zvolených operačných teplotách [22]

Technológia	Operačná teplota	$\sigma_{30^\circ\text{C}}$	$\sigma_{35^\circ\text{C}}$	$\sigma_{40^\circ\text{C}}$	$\sigma_{45^\circ\text{C}}$	$\sigma_{50^\circ\text{C}}$
NiCd	- 50°C až 50°C	0,90	0,80	0,73	0,65	0,57
NiMH	0°C až 40°C	0,85	0,75	0,65	0,52	0,35
PbA	- 30 až 40°C	0,69	0,51	0,37	0,25	0,14

Hodnoty v tabuľke 4–1 ukazujú operačné teploty použiteľnosti daných technológií vhodných na praktické nasadenie vo fotovoltaických aplikáciách. Zvýšená teplota spôsobuje zrýchlený proces starnutia, ale aj relatívne zvýšenie použiteľnej kapacity. Ako je zjavné z hodnôt pre batérie typu Ni-Cd, zvýšená teplota na ich životnosť nemá až taký zásadný vplyv ako pri ostatných technológiách. Pri postupnom zvyšovaní teploty o 10 °C dochádza u NiCd akumulátorov k približne 20 % znižovaniu životnosti. Pre olovené akumulátory záplavovej konštrukcie platí, že pri každom zvýšení o 10 °C sa znižuje životnosť takmer o 50 %. Táto silná teplotná závislosť môže spôsobovať problémy pri prevádzke fotovoltaického systému a mať zásadný vplyv na prevádzkové náklady. Namerané hodnoty boli získané v laboratórnych podmienkach zrýchlenými skúškami životnosti pri daných teplotách. Prevádzková teplota je kľúčovým faktorom pri zisťovaní stupňa poškodenia

Tab. 4-2 Porovnanie typov akumulátorov využívaných vo FV systémoch [22]

Typ technológie	N_{100}^a (x 1000 cyklov)	N_{80}^b (x 1000 cyklov)	N_{33}^c (x 1000 cyklov)	t_{cykly}^d (roky)	$t_{\text{plávajúci}}^e$ (roky)
NiCd	0,3 – 0,5	1,0 – 1,5	4,8 – 6,0	13 – 16	20 – 25
NiMH	0,6 – 1,0	0,8 – 1,5	2,8 – 3,0	7,7 – 8,2	8,0 – 10
PbA ^f	0,32–1,6	0,4–2,1	0,9 – 4,2	2,5 – 5,5	8,0 – 12

^a životnosť (počet cyklov) pri 100 % hĺbke vybitia pri teplote 20 – 25°C

^b životnosť (počet cyklov) pri 80 % hĺbke vybitia pri teplote 20 – 25°C

^c životnosť (počet cyklov) pri 33 % hĺbke vybitia pri teplote 20 – 25°C

^d $t = N_{33}/n$, kde $n = 365$ cyklov/rok pri 33% hĺbke vybitia

^f vyššie hodnoty reprezentujú výhody gélových batérií

Koniec životnosti batérie nastáva, keď batéria dosiahne 80 % svojej pôvodnej kapacity, prípadne, keď náhle prestane pracovať, napríklad z dôvodu vnútorného skratu. Keď sa akumulačné prvky nachádzajú v aplikáciách s nízkym percentom hĺbky vybitia, napríklad UPS záložné zdroje, ich životnosť je spravidla obmedzená tzv. floating life, resp. plavákovou charakteristikou pre daný typ batérie. V systémoch, kde dochádza k hlbokému vybíjaniu, je životnosť batérie definovaná charakteristickou závislosťou počtu cyklov pri danej hĺbke vybitia. Plaváková charakteristika sa používa pre odhad životnosti v závislosti na korózii, degradačných procesov prebiehajúcich v článku. Batéria nachádzajúca sa v plavákovom režime sa konštantne dobíja napätím, ktoré kompenzuje vplyv samovybíjania.

Tab. 4-3 Porovnanie uvažovaných typov technológií využívaných vo FV systémoch [22]

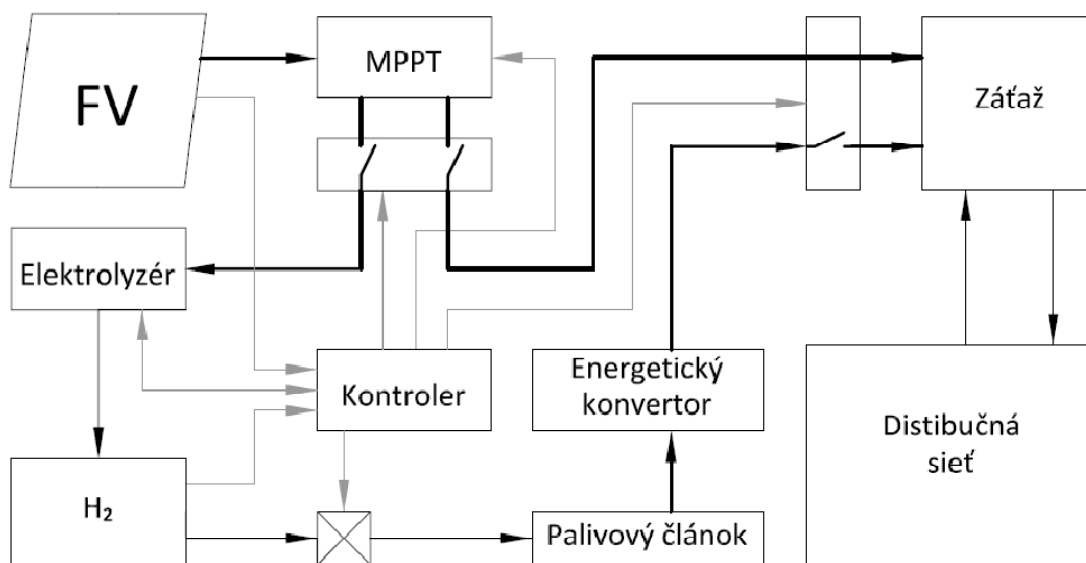
Technológia	NiCd	NiMH	PbA
Celková účinnosť premeny energie [%]	70-75	65-75	70-85 ^a
Samovybíjanie [%/mesiac]	15-20%	15 – 25%	1 – 5%
Merná energia [Wh/kg]	50-80	50-100	25-35 ^a
Hustota energie [Wh/dm ³]	100-150	80-300	60-130 ^a
Priemerná doba životnosti [rok] ^c	13 – 25	7-10	3-12r ^a
Očakávaná doba cyklov pri 80 % hĺbke	500-700	500-700	200-1500 ^a
Priemerná cena za kWh	700 €	1000 €	50 € – 250 € ^a
Zloženie kladnej elektródy	Ni(OH) / Ni(OH) ₂	Ni(OH) / Ni(OH) ₂	PbO ₂ / PbSO ₄
Zloženie elektrolytu	20% K(OH)	K(OH)	1,3kg/dm ³ H ₂ SO ₄
Zápornej kladnej elektródy	Cd / Cd(OH) ₂	MmH/Mm ^b	Pb / PbSO ₄

^a vyššia hodnota udáva cenovú hladinu pre gélové batérie^b zliatiny kovov vzácnych zemín^c vyššia hodnota udáva maximálnu životnosť pri plavákovom režime

Pri celkovom porovnaní technológií s ohľadom na cenu, energetickú hustotu, účinnosť a životnosť je zrejmé, že olovený akumulátor typu VRLA s gélovým elektrolytom je v dnešnej dobe jasnou voľbou v nasadení pre malé, prípadne stredne veľké stacionárne hybridné fotovoltaičné systémy. Cenová dostupnosť, vysoká účinnosť a nízka miera samovybíjania sú aspekty, ktoré sú rozhodujúce pri ich nasadení do prevádzky. Nepriaznivé prvky, ako napríklad relatívne nízka doba životnosti a malá merná hustota energie, sú vyvážené cenou, ktorá je hlavným kritériom pri návrhu hybridného systému.

5 VODÍKOVÁ AKUMULÁCIA VO FV SYSTÉMOCH

Vodík je flexibilné energetické médium, ktoré môže byť generované napríklad elektrolýzou vody. Toto je obzvlášť výhodné, pokiaľ je možné elektrolýzer jednoducho a efektívne pripojiť k zdroju elektrickej energie z obnoviteľných zdrojov, ako je FV panel. Elektrolýza vody je jedným z riešení pre výrobu vodíka, má určité prednosti, ako sú kompaktnosť, vysokú prúdovú hustotu a malé rozmery, čo poskytuje zisk veľkého množstva vodíka z pomerne malej oblasti. Ďalšia výhoda je celková modularita tejto technológie, ktorá umožňuje optimalizáciu v závislosti na požiadavkách pre konkrétne aplikácie [23].



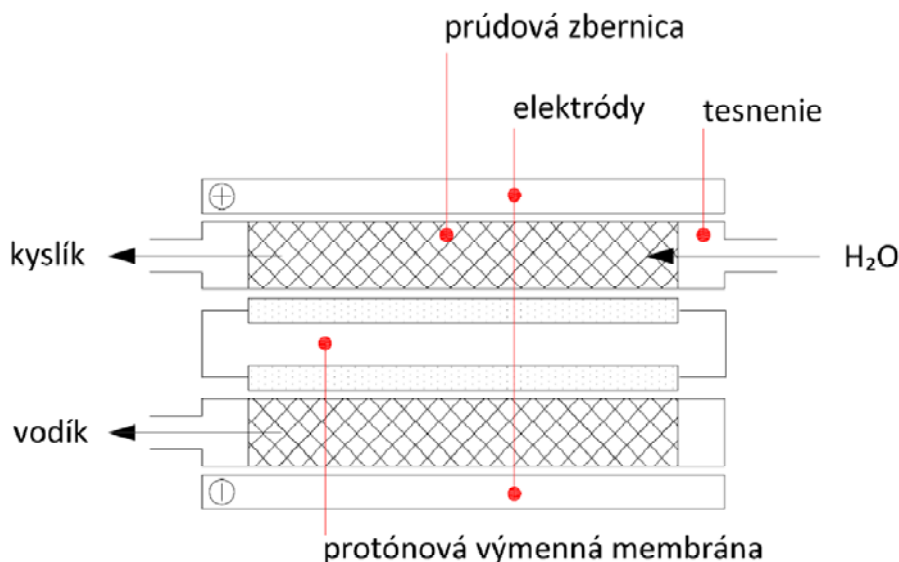
Obr. 5-1 Bloková schéma on-grid fotovoltaiického systému s akumuláciou do vodíku [4]

Obr. 5-1 znázorňuje principiálnu schému hybridného FV systému, kde je ako akumulačný prvok zvolený vodík. Skladá sa z určitých subsystémov, ktoré navzájom medzi sebou spolupracujú. Fotovoltaiické panely dodávajú energiu potrebnú na elektrolýzu vody, prípadne priamo dodávanú do záťaže. Multiplikačný člen zabezpečuje maximálny výkon, resp. efektívnosť s akou fotovoltaiika pracuje, udržiava napätie v požadovanej hladine v závislosti na parametroch FV článku udávané výrobcom. Výstupom z elektrolýzera je vodík, ktorý sa skladuje v nádobách na to určených. V dobe, kedy FV nie je schopná dodávať požadovaný výkon, zabezpečuje palivový článok, premieňajúci elektrochemickou reakciou naakumulovaný vodík na elektrickú energiu.

5.1 Subsystém zaisťujúci elektrolýzu

V súčasnej dobe je väčšina komerčných elektrolýzerov s kvapalným zásaditým elektrolytom na striedavý prúd. To umožňuje pre výrobu vodíka použiť elektrické siete, alebo iný energetický systém. Avšak, v prípade hybridného FV systému potrebuje DC-AC menič, v prípade, že elektrolýzer je jednosmerného typu, môže byť spojený priamo, prípadne cez DC-DC menič. Typická účinnosť je v priemere 55 – 75 %, systémy pre širšie komerčné nasadenie majú účinnosť pohybu okolo 65 %. Prúdová hustota sa pohybuje v rozmedzí 0,3 – 0,4

A/cm². Problém nastáva pri zachovaní elektrolytu v rovnováhe a schopnosti separácie vodíka a kyslíka. Technológia elektrolýzy založená na báze polymérov elektrolytu membrány (PEM), kde sú všetky časti systému pevné. PEM elektrolýzer je schopný prijímať široké spektrum príkonov, čo umožňuje priamu integráciu do systému s prerušovaným zdrojom energie, ako je FV systém.



Obr. 5-2 Elektrolýzer s pevným polymérovým elektrolytom

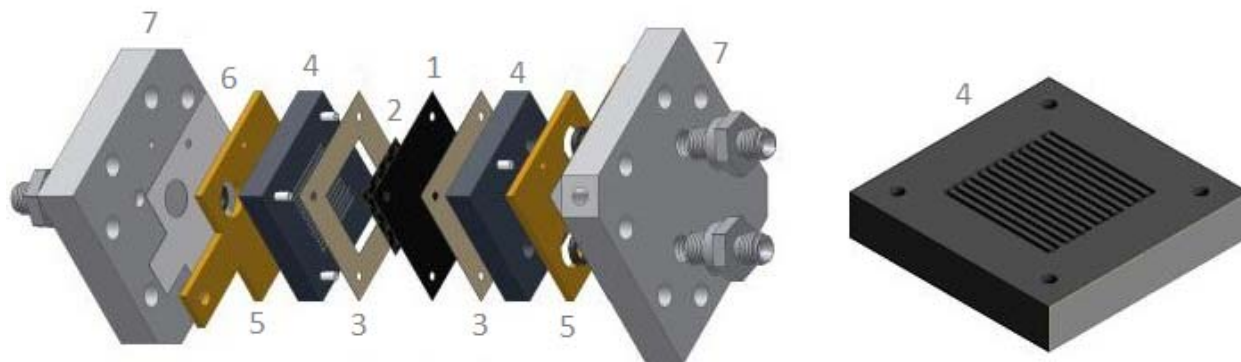
Funkcia PEM elektrolýzeru je znázornená na obr. 5–2. Voda je privádzaná k anóde, kde sa elektrolyticky rozloží na kyslík, protóny a elektróny. Atómy kyslíka sa na povrchu elektródy spojujú v plynný O₂, zatiaľ čo protóny prestupujú cez membránu. Elektróny, pre ktoré je membrána nepriepustná, prechádzajú vonkajším obvodom. Na katóde sa protóny spojujú s elektrónmi a vytvára sa plynný vodík. Aby nedochádzalo ku kontaminácii plynov, používa sa elektrolyt v pevnej forme. Ďalšia výhoda pevného elektrolytu je, že generovaný vodík môžeme generovať pri tlaku až do cca 15 barov bez nutnosti zapojiť kompresor. [5]

Tab. 5-1 Reakcie prebiehajúce na katóde a anóde pri elektrolýze

Popis reakcií na jednotlivých elektródach	Chemické rovnice
Reakcia rozkladu molekúl na anóde	$2 \text{H}_2 \rightarrow 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$
Reakcia prebiehajúca na katóde	$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$

5.2 Subsystem palivového článku

Palivový článok je jeden z moderných elektrochemických zdrojov prúdu, ktorý umožňuje priamu konverziu chemickej energie na elektrickú. Elektródy palivového článku nevstupujú do samotnej chemickej reakcie, teda nedochádza k materiálovým zmenám a článok má vysokú životnosť. Nevýhoda palivového článku spočíva v pomalejšej reakčnej dobe pri zmene záťaže.



Obr. 5-3 Schematický pohľad na časti palivového článku typu PEM [9]

Tab. 5-2 Popis označených komponentov palivového článku pre obr. 5–3.

Číselné označenie prvkov palivového článku	Popis jednotlivých prvkov
1	membrána typu PEM
2	porézna transponovaná vrstva
3	tesnenie
4	dosky s kanálkami pre prívod paliva a okysličovadla
5	elektród
6	izolátor
7	zapúzdzrenie

Tuhý polymér ako elektrolyt znižuje nebezpečenstvo korózie a ďalších nepriaznivých javov vyskytujúcich sa v článkoch s kvapalným elektrolytom. Nízka prevádzková teplota 70 – 80 °C zaisťuje dostatočne rýchly nábeh článku a nevyžaduje tepelné tienenie. Ako elektrolyt je použitá tenká polymérová membrána. Tá pôsobí ako elektrónový izolátor a súčasne aj ako výborný vodič vodíkových kationtov. Používaným materiálom je polymér na báze uhlíka a fluóru, podobný teflónu, ku ktorému sa pripájajú skupiny obsahujúce kyselinu sulfónovú. Protóny môžu voľne migrovať cez membránu, pričom straty v dôsledku vnútorného odporu elektrolytu sú nepatrné.

Anóda a katóda sú vyrobené aplikáciou malého množstva platinovej černe na jednu stranu tuhého listu porézneho grafitového papiera. Grafitový papier bol opatrený teflónovou ochranou proti zvlhnutiu. Elektrolytická membrána je následne osadená medzi anódu a katódu a všetky tri časti sú spojené do jedného celku.

Obe elektródy majú na opačných stranách jemné kanáliky, ktoré sú vyrobené z grafitu. Steny medzi kanálkami zaisťujú elektrický kontakt so zadnou časťou elektródy a vedú elektrický prúd do vonkajšieho obvodu. Samotné kanáliky rozvádzajú na anóde palivo a na katóde okysličovadlo.

Tab. 5-3 Priemerná energetická účinnosť subsystémov hybridného systému [5]

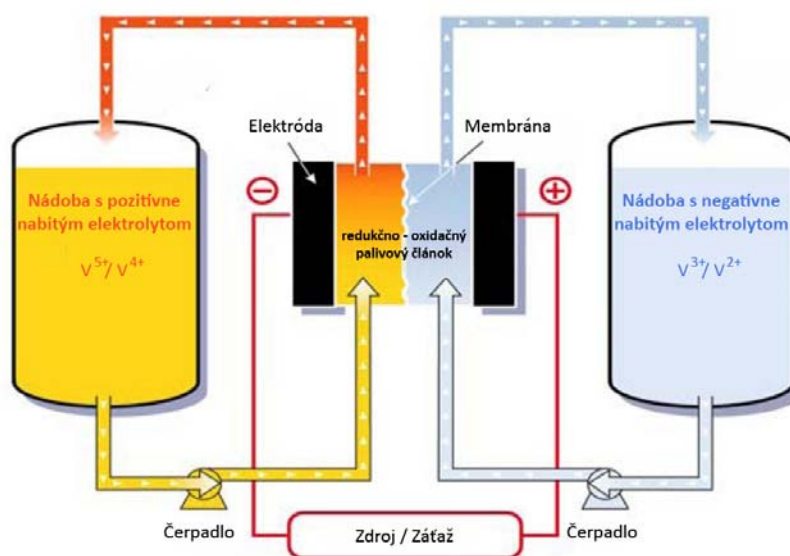
subsystém	Energetická účinnosť
FV článok	11,2[%] – 17,1 [%]
invertor	90 [%]
elektrolyzér	55–75 ^a [%]
zásobáreň vodíku	100 [%]
palivový článok	30 – 44 [%]

^a hodnoty dosiahnuté v laboratórnych podmienkach

Vodík ako akumulčný prvok v spojení s FV systémom má niekoľko nesporných výhod, akými sú modularita a adaptivita, oproti v dnešnej dobe komerčne používaným technológiám. Napriek výhodám je najväčší problém pri komerčnom nasadení cenová hladina, v ktorej sa takéto systémy pohybujú. Z tab. 2 – 4 vidíme, že celková priemerná účinnosť takéhoto akumulčného systému sa pohybuje okolo 20 %. Očakáva sa, že v nasledujúcich niekoľkých dekádach sa podarí túto technológiu vylepšiť a celkovo zefektívniť [23].

6 VRB SYSTÉM ENERGETICKEJ AKUMULÁCIE

Ide o zariadenie určené pre hospodárne uskladňovanie elektrickej energie chemicky viazanej v elektrolyte. Základom tejto technológie je redukčno-oxidačný regeneračný článok schopný premieňať chemickú energiu na elektrickú, resp. elektrickú energiu na chemickú. Takto premenená energia je chemicky uskladnená v elektrolyte v rôznych iónových tvaroch vanádia nachádzajúcich sa v zriedenej kyseline sírovej. Z praktického hľadiska môžeme povedať, že skladovanie elektrolytu je nenáročné oproti plyným látkam, ako je vodík alebo metán, ktoré vyžadujú vysokotlakové nádoby [24].



Obr. 6-1 Principiálny koncept systému VRB

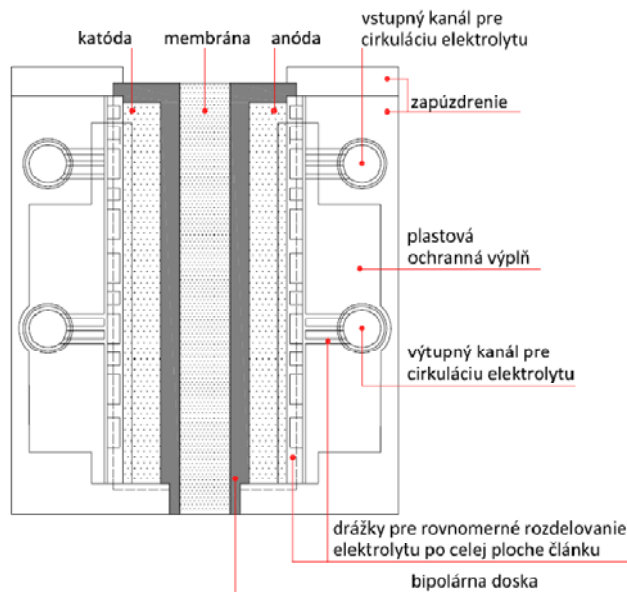
Do článkov sa kyselina čerpá cez membránu z dvoch oddelených nádrží, v ktorých je uskladňovaná. Jedna forma elektrolytu sa elektrochemicky oxiduje, druhá sa elektrochemicky redukuje. Pri tejto reakcii sa vytvára elektrický prúd, ktorý je elektródami privádzaný do vonkajšieho obvodu. Keďže ide o vratnú reakciu, je možné aj znovunabíjanie elektrolytu. Samo- vybíjanie je možné znížiť minimalizovaním kontaktnej doby reagujúcich látok vo vnútri zásobníka.

Samotný článok obsahuje anódu a katódu, ktoré sú oddelené membránou. Membrána je schopná prepúšťať ióny. Anóda je spojená so zásobníkom negatívne nabitého elektrolytu, podobne katóda je spojená s kladne nabitým elektrolytom. Čerpadlá umožňujú cirkuláciu v celom systéme naznačeným spôsobom. V závislosti na tom, či dochádza k nabíjaniu alebo vybíjaniu, sa mení valenčná hodnota elektrónov vanádu podľa tabuľky 6–1.

Tab. 6-1 Popis redukčných a oxidačných procesov pre nabíjanie a vybíjanie VRB systému

Redukčný proces	Prebiehajúca reakcia	Oxidačný proces
$V^{3+} + e^- \Rightarrow V^{2+}$	Nabíjanie $\rightarrow$	$V^{4+} \Rightarrow V^{5+} + e^-$
$V^{5+} + e^- \Rightarrow V^{4+}$	Vybíjanie $\rightarrow$	$V^{2+} \Rightarrow V^{3+} + e^-$

Zariadenia využívajúce túto technológiu majú schopnosť uskladňovať elektrickú energiu v rozpätí od rádovo kW a ich následných prírastkoch až na požadovanú hodnotu. Keďže sa energia ukladá do elektrolytu, udáva sa jej hodnota v jednotkách Wh / liter, prípadne W/kg. Energetická hustota elektrolytu je funkcia aplikačných požiadaviek a v praxi sa môže pohybovať medzi 15 – 25 Wh/liter, podľa meraní počas jedného plného cyklu nabíjania / vybíjania. Hustota výkonu (W/kg) je funkcia palivových článkov a elektrolytu. U väčších zariadení sa uvažuje s hodnotami 100 – 150 W/kg, u menších zariadení dosahuje táto hodnota okolo 80 W/kg.



Obr. 6-2 Principiálny koncept redukčno-oxidačného regeneračného článku.

Samotné nabíjanie prebieha rovnakou rýchlosťou ako vybíjanie. V dôsledku strát je ale potrebné dodať približne o 25 % viac energie. Praktický pomer nabíjania a vybíjania zabezpečujúci optimálnu prevádzku je 1,7 : 1. Zariadenia tohto typu majú odhadovanú životnosť okolo 15r, táto doba sa dá predĺžiť výmenou membrán v palivových článkoch. Zariadenie je schopné absolvovať viac ako 12 000 cyklov bez toho, aby sa znížila jeho účinnosť. Jediné pohyblivé časti, ktoré sa nachádzajú v takýchto zariadeniach sú čerpadlá, ktoré zabezpečujú cirkuláciu elektrolytu do palivových článkov.

Tab. 6-2 Základné technické parametre systému VRB [7]

Popis základných parametrov	Hodnota daných parametrov
Teoretická hustota energie	30 – 47 [Wh/l]
Praktická hustota energie	15 – 25 [Wh/l]
Hustota výkonu	80 – 166 [W/kg]
Tepelný rozsah	0 – 40 °C
Účinnosť	65 – 75 %
Hĺbka vybitia	75 %
Počet cyklov	> 10 000
Náklady na údržbu	0,01 [€/kWh]
Cena	230 – 500 [€/kWh]

7 STRIEDAČE

Na striedače sú kladené špecifické požiadavky. Zaisťiť, aby bol fotovoltaiický systém prevádzkovaný v bode maximálneho výkonu (MPP) a aplikácia sínusového prúdu do siete. Vzhľadom na to, že sa menič pripája do siete, musí spĺňať určité štandardy, ktoré sú definované v platných normách týkajúcich sa fotovoltaiických elektrární. Normy určujú požiadavky na kvalitu napájania, detekciou ostrovného režimu, uzemnenie, atď. Súhrn a porovnanie jednotlivých štandardov je uvedený v tab. 7–1. Ako je vidieť, norma EN (platiaca v Európe) sa vyrovnáva jednoduchšie s limitmi harmonických prúdov než normy IEEE a IEC. Toto sa tiež premietá v zvolenej typológii striedačov, kde sa postupom času ustúpilo od používania veľkých tyristorových meničov a začali sa používať meniče s IGBTa MOSFET technológiou.

Menič musí byť tiež schopný prejsť do ostrovného režimu a svojím pôsobením zaisťiť ochranu osôb a samotného zariadenia. Ostrovná prevádzka je ďalším zo spôsobov, akým môžeme menič prevádzkovať, v tomto prípade je menič odpojený od siete, napája len miestne odbery. Detekčný spôsob rozoznávania ostrovného režimu sa delí na aktívny a pasívny. Pasívne metódy nemajú žiadny vplyv na kvalitu, len monitorujú parametre siete. Aktívny systém zavádza rušenie do siete a sleduje účinky. Tento prístup monitorovania môže mať negatívny dopad na kvalitu elektrickej energie, ako aj na paralelné radenie meničov [25].

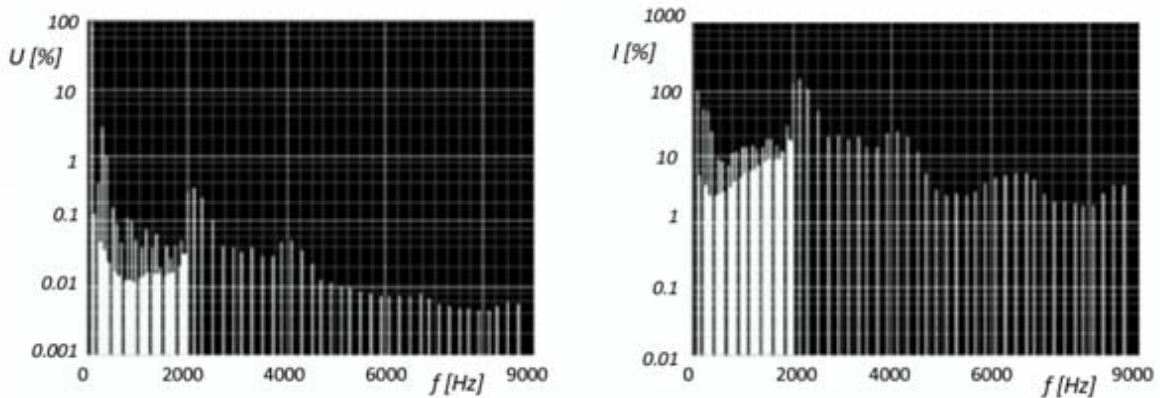
Tab. 7-1 Súhrn štandardov z noriem týkajúcich sa napojenia FV systému na sieť [25]

norma	IEC61727	IEEE1457	EN61000-3-2
Menovitý výkon	10kW	30kW	16A x 230V = 3,7kW
Limity harmonických prúdov	(3 ^h -9 ^h) 4,0% (11 ^h -15 ^h) 2,0% (17 ^h -21 ^h) 1,5% (23 ^h -33 ^h) 0,6%	(2 ^h -10 ^h) 4,0% (11 ^h -16 ^h) 2,0% (17 ^h -22 ^h) 1,5% (23 ^h -34 ^h) 0,6% (> 35 ^h) 0,3%	(3 ^h) 2,30 A (5 ^h) 1,14 A (7 ^h) 0,77 A (9 ^h) 0,40 A (11 ^h) 0,33 A (13 ^h) 0,21 A (15 ^h -39 ^h) 2,25h
Maximálny prúd totálneho harmonického skreslenia	5,0%	5,0%	–
Účinník pri 50% menovitého	0,9	–	–
Iniektovanie jednosmerného prúdu	Menej než 1,0% menovitého výstupného prúdu	Menej než 0,5% menovitého výstupného prúdu	< 0,22 A – zodpovedá 50W jedno pulzného usmerňovača
Rozsah napätia pre menovitú prevádzku	85% – 110% (196V – 253V)	88% – 110% (97V –121V)	–
Frekvenčný rozsah pre menovitú prevádzku	49Hz – 51Hz	59,3Hz –60,5Hz	–

^h číslo harmonickej

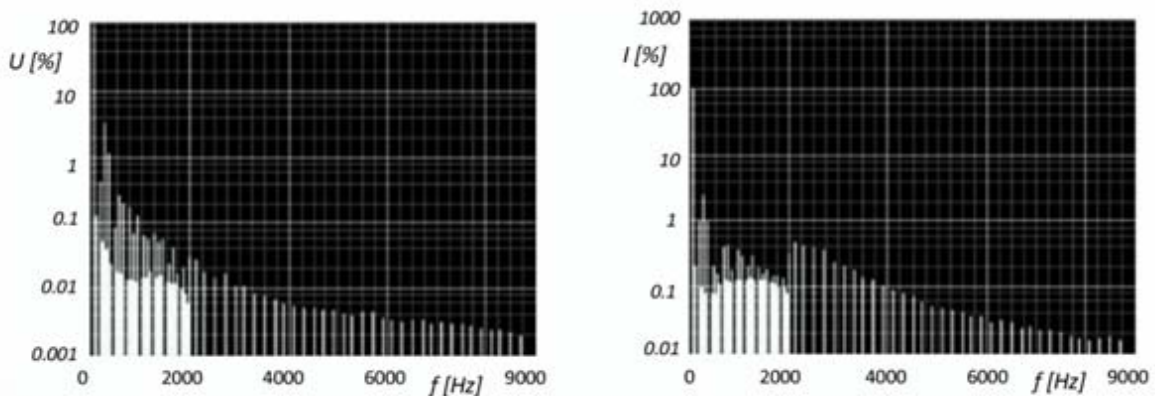
Normy IEEE a IEC obmedzujú maximálnu prípustnú hodnotu injektovanej jednosmernej zložky prúdu do siete. Toto obmedzenie sa zavádza z dôvodu zabránenia nasýtenia distribučných transformátorov. Prípustné limity sú pomerne malé (0,5 % a 1,0 % menovitého výstupného prúdu), a takéto hodnoty je dosť náročné presne merať. Meranie môžeme spresniť vylepšením meracieho obvodu, alebo zaradením transformátoru sieťového kmitočtu medzi menič a sieť. Niektoré druhy meničov používajú transformátor vložený do vysokofrekvenčného DC-DC prevodníku pre galvanické oddelenie medzi fotovoltaickými modulmi a sieťou. To však nerieši problém s iniektovaním jednosmernej zložky prúdu, ale zjednodušuje uzemnenie fotovoltaických panelov.

Fotovoltaické on-grid jednotky pripojované k sieti NN sú teda zdrojom harmonických prúdov. Pokiaľ je ale v spoločnom napájacom bode (u sieti NN) dodržaná podmienka, že pomer zdanlivého výkonu výroby k zdanlivému trojfázovému skratovému výkonu je menší ako 1/120, je možné zariadenie bez problémov pripojiť. Je dôležité si uvedomiť, že prúdy tretej harmonickej a jej násobkov sa v uzle sčítajú, a tým môže dochádzať k preťažovaniu stredných vodičov.



Obr. 7-1 Frekvenčné spektrum malej FVE – najnepriaznivejší priebeh [11]

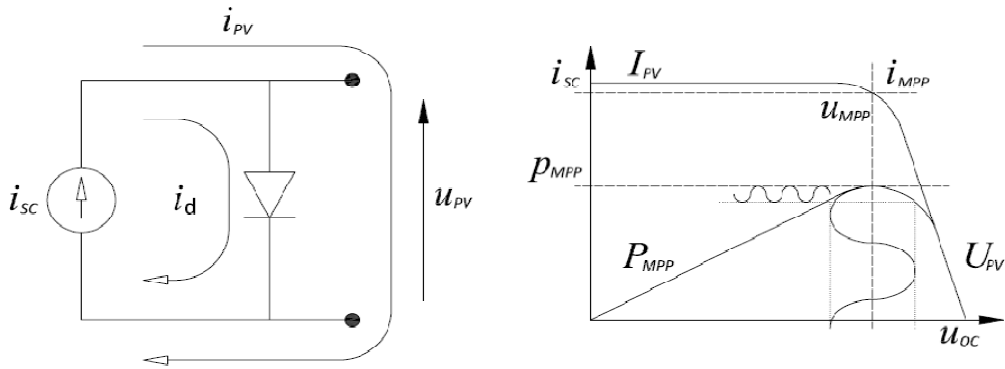
Pre priblíženie, ako vyzerá napäťové a prúdové frekvenčné spektrum malej fotovoltaickej elektrárne, môžu poslúžiť výsledky merania podľa [11]. Frekvenčná analýza bola uskutočnená vo frekvenčnom rozsahu 50 Hz – 9 kHz v desaťminútových intervaloch, pre striedač s menovitým výkonom 2,3 kW. Meranie prebiehalo v letnom mesiaci, kontinuálne po dobu desiatich dní. Cieľom merania bolo zistiť obsah harmonických napätí a prúdov.



Obr. 7-2 Frekvenčné spektrum malej FVE – najpriaznivejší priebeh [11]

Obrázok 7–2 popisuje stav o 7:00 h ráno pre jednu fázu, kedy fotovoltaická elektrárňa ešte nedodá výkon do siete ($P = -8\text{ W}$, $S = 205\text{ VA}$, $I = 0,9\text{ A}$). Prúdové spektrum vykazuje vysoký obsah vyšších harmonických, a i napriek nízkej efektívnej hodnote prúdu dochádza k výraznému zvýšeniu obsahu harmonických aj pre napätie. Obr. 7–2 znázorňuje stav o 14:00 h, kedy bol do siete dodávaný výkon približne 2 kW. Prúdové a napäťové spektrum má s porovnaním so stavom o 7:00 h výrazne menší obsah vyšších harmonických [11]. Keďže všetky striedače musia spĺňať hodnoty maximálnej úrovne harmonických a medzi harmonických prúdov injektovaných do siete v súlade s normou EN 61000–3–2, nemalo by dochádzať k ovplyvňovaniu signálu HDO.

7.1 Požiadavky na stridač definované fotovoltaickými modulmi



Obr. 7-3 Schematický Model a A-V charakteristika fotovoltaického článku.

Elektrický model FV článku a jeho A–V charakteristika je znázornená na obr. 7–3. Menič musí zaručiť, že FV panel je prevádzkovaný v stave, kedy je využité maximálne množstvo energie. Toto je zabezpečené multiplikačným členom. To zahŕňa aj zvlnenie na svorkách FV panelov, ktoré je nepatrné, takže prevádzka v bode maximálneho výkonu je zabezpečená bez veľkých výkyvov. Analýzou schematického modelu zisťujeme vzťah medzi amplitúdou zvlnenia napätia a pomerom využitia [25].

$$u = \sqrt{\frac{(k_{PV} - 1) \cdot 2 \cdot P_{MPP}}{3 \cdot \alpha \cdot U_{MPP} + \beta}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{(k_{PV} - 1) \cdot 2 \cdot P_{MPP}}{\frac{d^2 p_{PV}}{du_{PV}^2}}} \quad (7.1)$$

Kde u je amplitúda zvlneného napätia, P_{MPP} a U_{MPP} sú hodnoty výkonu a napätia v bode maxima, α a β sú koeficienty popisujúce druhý rád Taylorovho rozvoja pre hodnotu prúdu, miera využitia je daná podielom priemerného výkonu a teoretického maximálneho výkonu. Koeficienty sú počítané ako

$$i_{PV} = \alpha \cdot u_{PV}^2 + \beta \cdot u_{PV} + \gamma \quad (7.2)$$

$$u_{PV} \approx U_{MPP} + u \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (7.3)$$

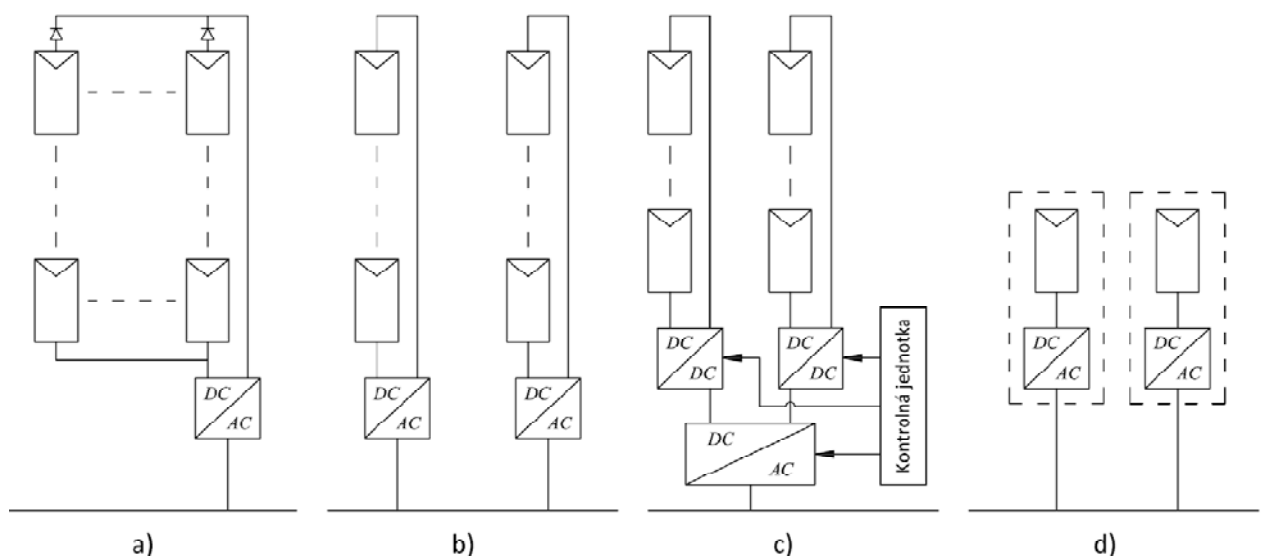
V prípade, že prevedieme výpočet podľa predchádzajúcich vzorcov zistíme, že amplitúda zvlnenia napätia musí byť nižšia ako 8,5 % multiplikačného napätia, teda napätia, pri ktorom

dosahujeme maximálny výkon, aby bola zachovaná účinnosť do 98 %. Napríklad, fotovoltaický panel s multiplikačným napätím 35 V by nemal byť vystavený amplitúde zvlňenia napätia prekračujúcu hodnotu 3V.

7.2 Vývoj striedačov

Model zapojenia využívajúci centralizovaný striedač, ktorý koordinuje veľký počet fotovoltaických modulov sa v dnešnej dobe už nepoužíva. Ako je znázornené na obr. 7–4a), v tomto zapojení sa fotovoltaické moduly spájajú do série takzvaného stringu tak, aby vytvárali dostatočne vysoké napätie. Takto vytvorené stringy sa následne spájali paralelne prostredníctvom diód za účelom dosiahnutia požadovaného výkonu. Systém s centralizovaným meničom trpel závažnými nedostatkami ako je nutnosťou použitia hrubších káblov medzi fotovoltaickými modulmi a striedačom, stratami v dôsledku centralizovaného multiplikačného riadenia, nesúrodosť medzi jednotlivými fotovoltaickými panelmi. Pripojenie k sieti bolo obvyčajne realizované pomocou tyristorov, ktoré pri svojom chode emitovali mnoho vyšších harmonických zložiek prúdu, čo malo za následok zlé kvalitu elektrickej energie dodávanú do siete. [14]

Súčasný trendy využívajú redukovaný model centrálného zapojenia, kde je len jeden string s fotovoltaickými panelmi zapojený na menič, ako je znázornené na obr. 7–4 b). Vstupné napätie by malo byť dostatočne vysoké, aby sa zabránilo napäťovému kolísaniu. To vyžaduje približne 16 FV panelov v jednej vetve, kde napätie naprázdno môže dosiahnuť až 720V. V takom prípade použijeme mosfet / igbt súčiastky dimenzované na hodnotu 1000V. Nominálne napätie je však nižšie, pohybuje sa v rozmedzí 450 – 510V. Keďže aplikujeme multiplikačný člen na každú vetvu, zvyšuje sa tak celková účinnosť oproti centrálnemu zapojeniu. Obrázok 7–4 d) popisuje integráciu striedača a FV panelu do jedného zariadenia. Týmto krokom sa odstraňuje nesúlad medzi fotovoltaickými modulmi, pretože každému modulu je priradený práve jeden striedač. Tým je zabezpečené, že každý panel poskytuje optimálny výkon. Použitá koncepcia zabezpečuje systému, nevýhodou je vyššia cena za watt z dôvodu zložitejšej typológie obvodu. [14]

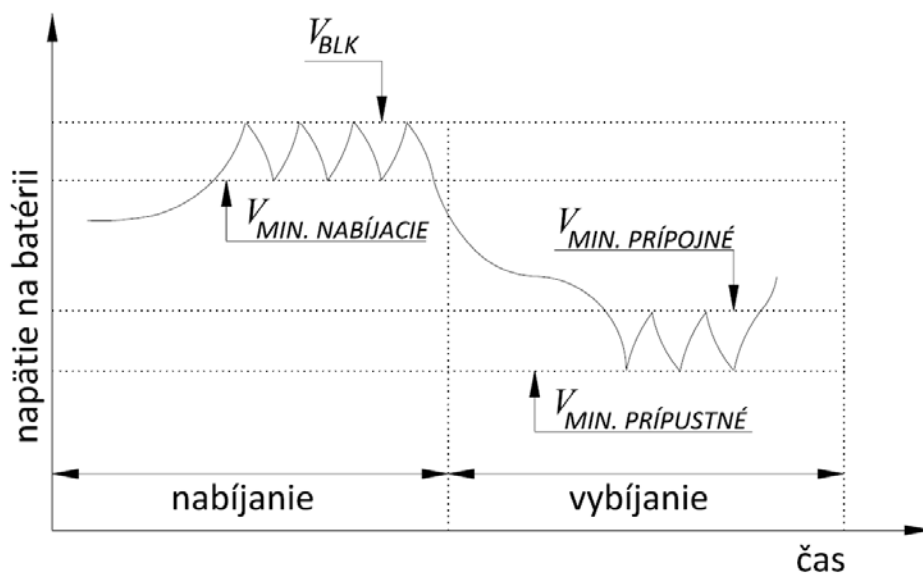


Obr. 7-4 Spôsoby zapojenia fotovoltaických striedačov

Budúci vývoj smeruje k multi stringovému zapojeniu, znázornenému na obr. 7–4c). Ako je zrejmé, niekoľko vetiev s vlastným DC – DC meničom je pripojených k jednému centrálnemu DC – AC meniču. To je výhodné s porovnaním s centralizovaným zapojením, pretože každú vetvu je možné ovládať samostatne. Zo začiatku môžeme prevádzkovať len niekoľko vetiev. Postupom času je možné veľmi jednoducho pripájať nové reťazce do už existujúcej platformy, tým je dosiahnutá celková flexibilita. [14]

8 REGULÁCIA NABÍJANIA

Primárnou funkciou regulátorov nabíjania vo fotovoltaických aplikáciách je zabrániť nežiaducemu prebíjaniu a hlbokému vybíjaniu. Každý fotovoltaický systém s nepredvídateľným zaťažením, nedostačujúcou alebo prevyšujúcou kapacitou batérií, vzhľadom na priemernú dennú záťaž vyžaduje regulátor. Ten bude odpájať batérie pri prekročení maximálnej, prípadne minimálnej prípustnej úrovne napätia na batériách. Algoritmus nabíjania určuje efektivitu nabíjania z fotovoltaických článkov a v konečnom dôsledku aj schopnosť systému vyhovieť požiadavkám na zaťaženie. Ďalšie s jeho funkcií je teplotná kompenzácia, nastavenie alarmov a špecifických riadiacich funkcií zvyšujúcich celkovú účinnosť a efektivitu. Existuje niekoľko základných postupov riadenia nabíjania sledujúcich určité kontrolné parametre. Obr. 8-1 ukazuje základné regulačné hodnoty na zjednodušenom diagrame.



Obr. 8-1 Popis základných regulačných hodnôt [15]

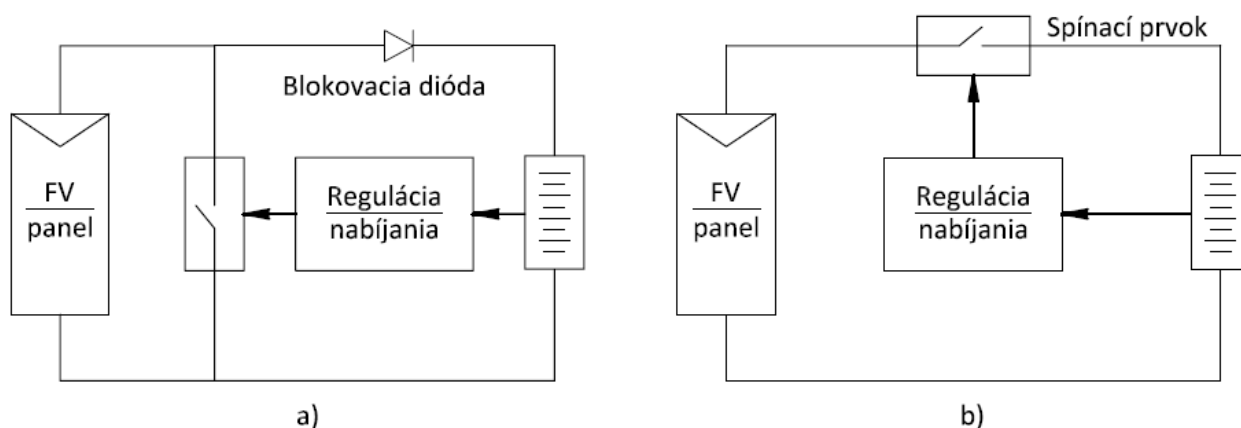
Maximálne dovolené nabíjacie napätie (V_{BLK}) je jeden z hlavných regulačných parametrov pri nabíjaní. Tento regulačný bod je nastavený na maximálnu možnú hodnotu, pri ktorej nedochádza k prebíjaniu. Po dosiahnutí tohto limitu dochádza buď k odpojeniu alebo k regulácii nabíjacím prúdu. Minimálne nabíjacie napätie (V_{MIN}) je úroveň pri ktorej odpájame batérie od zdroja, dochádza k pozvoľnému poklesu napätia na článkoch. Miera poklesu je úmerná veľkosti pripojeného odberu, prípadne miere samovybíjania. Ak pokles napätia dosiahne nastavenej úrovne, dochádza k opätovnému pripojeniu na nabíjací zdroj. V prípade minimálneho napätia ide o nastavenie najnižšej prípustnej hodnoty napätia, pri ktorej sa odpája záťaž od batérií. Týmto krokom zabraňujeme prílišnej hĺbke vybitia, čím vlastne predlžujeme celkovú životnosť. V bežných fotovoltaických aplikáciách sa nastavuje táto hodnota na úroveň 11,0 – 11,5V, čo zodpovedá približne 75 – 90 % hĺbke vybitia. Minimálne prípojné napätie batérie ($V_{MIN\ PRÍPOJNÉ}$) je napätie, pri ktorom logika nabíjania opäť umožňuje pripojiť záťaž. Úroveň tohto napätia sa pohybuje na hodnote 12,5 – 13,0V. [15]

Tab. 8-1 Vzťah medzi napätím naprázdno a mierou vybitia pre šesť článkovú batériu typu PbA

	Napätie naprázdno [V]							
	11,76	11,97	12,18	12,27	12,39	12,45	12,54	12,63
SOC ^a [%]	Dd ^b	25	50	60	75	80	90	100

^a miera nabitia^b hlboké vybitie

Vzhľadom na to, že fotovoltaické články majú prúdové obmedzenie, môže dochádzať ku spojeniu nakrátko jednotlivých modulov, stringov bez poškodenia. Toto je základom pri paralelnej regulácii nabíjania. Ako vidíme na obr. 8–2a), ktorý reprezentuje princíp tohto zapojenia, dochádza ku skratovaniu FV článkov v závislosti na regulačných požiadavkách nabíjacieho procesu. Všetky typy paralelnej regulácie musia obsahovať blokovaciu diódu, ktorá je zaradená v obvode tak, aby zabránila skratovaniu batérie pri tomto type regulácie. Keďže dochádza k úbytku napätia medzi FV panelmi a riadiacim členom, nikdy nedochádza k ideálnemu spojeniu nakrátko. Z toho dôvodu sa na väčšinu regulátorov umiestňuje chladič. Tento typ regulácie je obvyčajne dimenzovaný pre fotovoltaické aplikácie s prúdovým výstupom menším ako 20A. Ako regulačný prvok sa obvyčajne používa výkonový tranzistor typu mosfet, prípadne iný typ, v závislosti od konkrétneho modelu.



Obr. 8-2 Blokové zapojenie paralelnej a sériovej regulácie nabíjania [15]

Existuje niekoľko variantov, ako spínať paralelnú regulačnú jednotku. Ako prvé môžeme uvažovať lineárne spínanie, ktoré využíva paralelné pripojenie zenerovej diódy k batérii. V prípade dosiahnutia žiadanej hodnoty napätia dochádza k postupnému prerazu a tým k regulácii nabíjacieho napätia. Regulácia prebieha lineárne, teda nedochádza k stavom zapnuté / vypnuté. Limitujúcim faktorom je najmä výkon a cena zenerovej diódy. Pri nelineárnom spínaní sa nabíjací proces ukončuje zopnutím paralelne pripojenej regulácie. Keď napätie na batérii klesne pod nastavenú hodnotu (napríklad vplyvom samo vybíjania), regulátor opäť zopne akčný člen a pokračuje v nabíjaní. Nelineárne spínané regulátory sa najlepšie hodia pre malé fotovoltaické systémy, keďže majú relatívne nízke výkonové straty

Z dôvodov spomenutých obmedzení týkajúcich sa paralelnej regulácie sa sériový spôsob regulovania nasadzuje pri fotovoltaických aplikáciách s vyšším výstupným prúdom. Ako z názvu vyplýva, tento typ regulácie pracuje v sérii medzi fotovoltaickým polom a batériami.

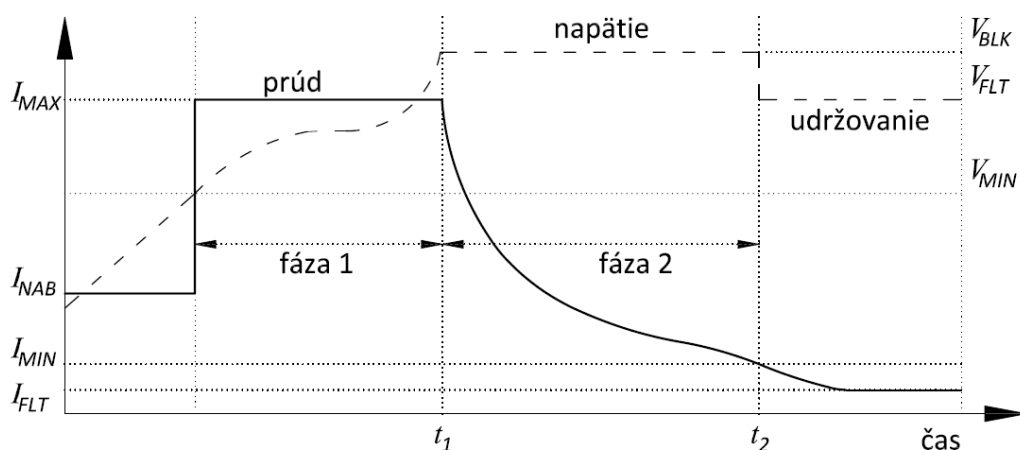
Obr. 8–2b) je znázorňuje koncepciu typickej sériovej regulácie. Ako spínací prvok je použité relé, prípadne polovodičový prvok, ktorý spína alebo rozpína obvod až do doby plného nabitia akumulátorov. Spínací prvok môže tiež obmedziť veľkosť prúdu a takýmto spôsobom udržiavať nominálnu hodnotu napätia na akumulátoroch a tým pádom kompenzovať vplyv samovybíjania. Pri sériovej regulácii nedochádza k skratovaniu akumulátorov, z toho dôvodu nie je potrebná blokovácia dióda.

8.1 . Nabíjanie akumulátorov typu PbA

Na základe záverov z kapitoly štyri sa bude práca ďalej zameriavať len na algoritmy nabíjania týkajúce sa olovených akumulátorov.

Rýchle nabíjanie u tohto typu akumulátorov nie je možné. Nabíjanie trvá 12 – 16 hodín, u veľkokapacitných batérií dosahuje čas nabíjania až 36 hodín. Tento čas je pre FV systémy neúmerne dlhý vzhľadom na charakter ich činnosti. Pri vyššom nabíjacom prúde a presnom riadení je možné dosiahnuť plného nabitia za približne 10 hodín. Samozrejme, musíme si uvedomiť, že tieto hodnoty vychádzajú z úvah, že akumulátor je úplne vybitý.

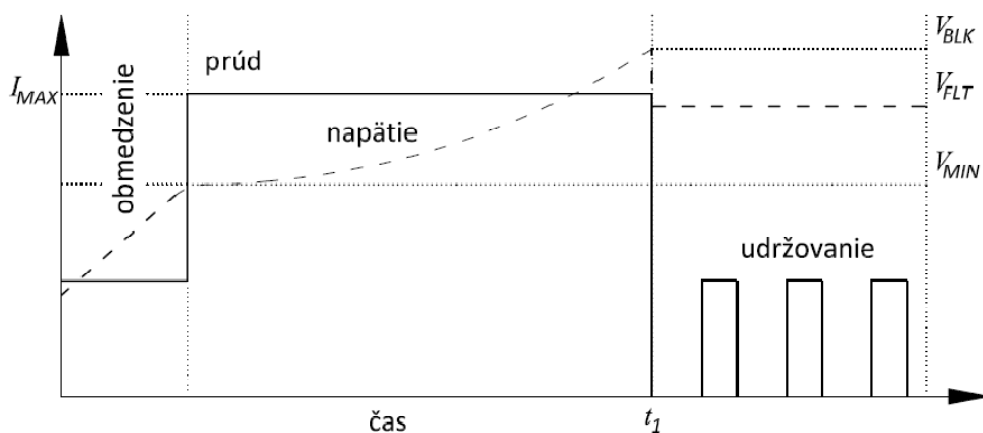
Ako je naznačené na obr. 8–3, batéria je nabíjaná maximálnym dostupným prúdom I_{MAX} z FV panelov, ktorý rešpektuje stav nabitia batérie. Keď je dosiahnutá požadovaná hodnota napätia na akumulátoroch, dochádza v čase t_1 k odpojeniu od zdroja. V tomto okamihu je batéria nabitá približne na 70 % svojej menovitej kapacity. Ďalší z postupov ukončenia nabíjacieho procesu, kde po dosiahnutí žiadanej hodnoty V_{BLK} , dochádza k držiavaniu tejto hodnoty. Nabíjací prúd klesá na 3 % svojej maximálnej hodnoty. V tomto okamihu je batéria plne nabitá. Fáza dva je dôležitá predovšetkým kvôli zachovaniu menovitej kapacity. Hodnota V_{BLK} rešpektuje hornú medzu napätia pri rýchlom nabíjaní, ktorá je špecifikovaná výrobcom. Táto cieľová hodnota napätia sa pohybuje v rozmedzí 2,45 – 2,5V pri teplote 25 °C na článok.



Obr. 8-3 Dvojstupňový napäťový algoritmus nabíjania [13]

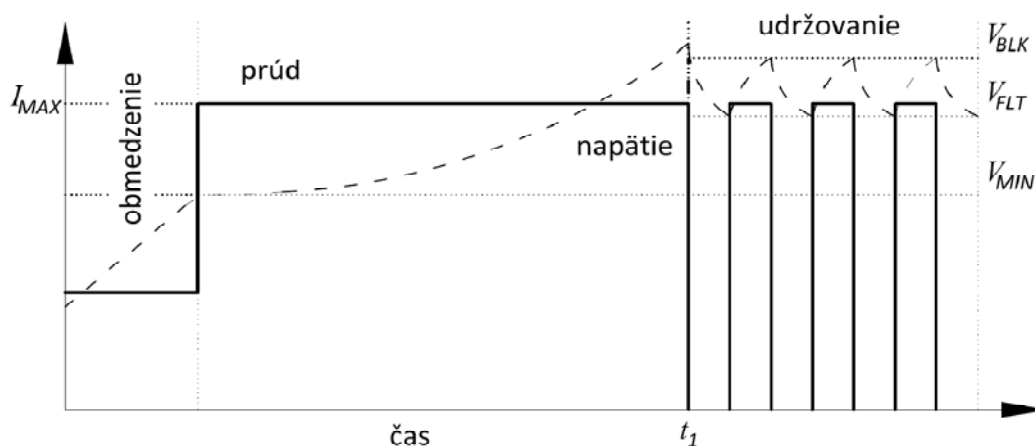
Pri použití dvojstupňového prúdového algoritmu je nabíjací prúd regulovaný na hodnotu I_{MAX} , až do doby, kedy napätie na článku nedosiahne hodnotu V_{BLK} . Na to, aby sme udržali hodnotu napätia V_{FLT} využijeme prúdové pulzy s presne nadefinovanou šírkou a frekvenciou.

Takto dosiahneme priemernú hodnotu prúdu I_{MIN} , ktorá bude schopná udržať konštantnú hodnotu napätia V_{FLT} .



Obr. 8-4 Dvojstupňový prúdový algoritmus nabíjania [13]

Alternatívna metóda je založená na pulznom spínaní, kedy nabíjame v určitých časových intervaloch maximálnym prúdom I_{MAX} , prípadne nedodávame žiadny prúd. Hodnota nabíjacieho prúdu I_{MAX} je uvedená ako funkcia kapacity batérie v ampér hodinách. Teda v prípade, že nabíjame batériu s kapacitou 5Ah prúdom 1C, jeho hodnota je 5A. Princíp pulzného nabíjania je znázornený na obr. 8-5. V čase t_1 , kedy dosiahne napätie na batérii hodnotu V_{BLK} , dochádza k prerušeniu nabíjacieho prúdu do doby, kedy napätie nedosiahne hodnotu V_{FLT} . Maximálny nabíjací prúd je následne obnovený v čase t_2 a až do doby, kedy napätie opäť stúpne na hodnotu V_{BLK} . Jedná sa o takzvaný pulzný algoritmus nabíjania.



Obr. 8-5 Pulzný algoritmus nabíjania [13]

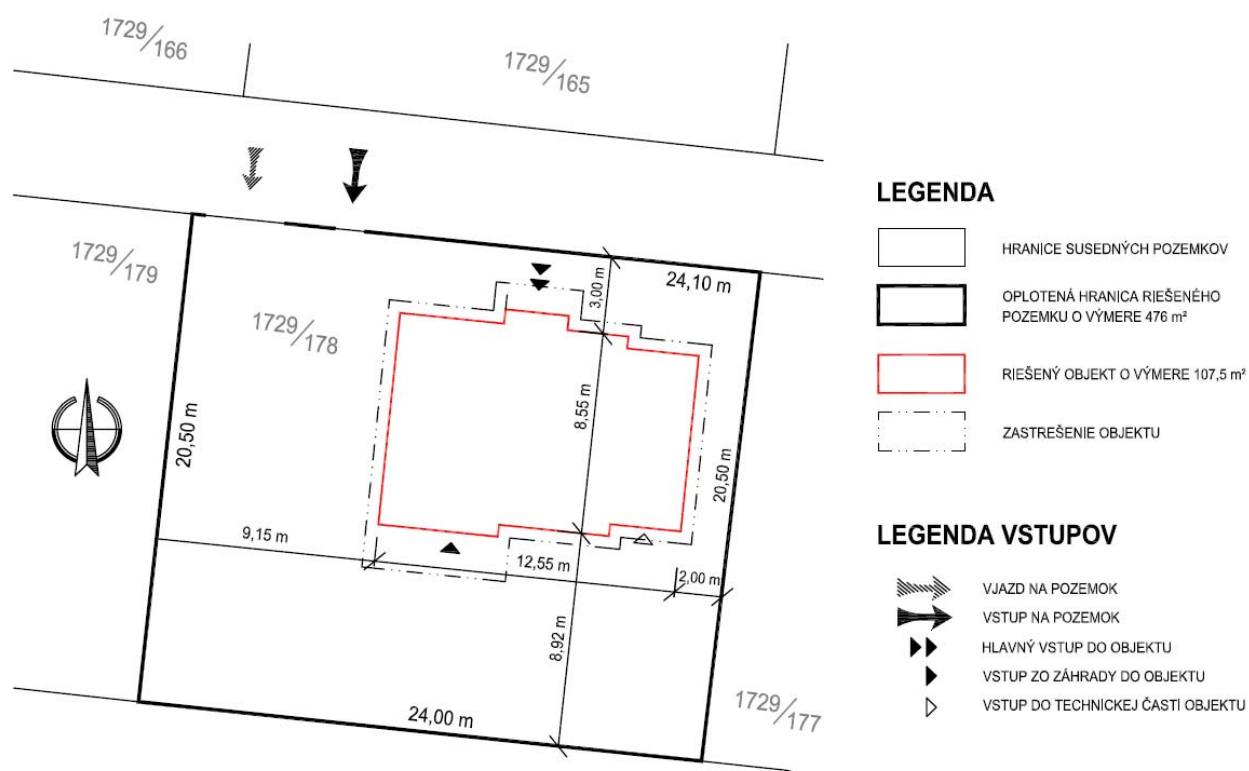
Nevýhodou týchto metód je, že nastavené prahové hodnoty nie vždy zodpovedajú plnému stavu nabitia. Tento jav je spôsobený zmenou veľkosti nabíjacieho prúdu, ktorý sa mení podľa atmosférických podmienok, resp. podľa intenzity osvetlenia dopadajúceho na fotovoltaické panely. Ďalším z negatívnych aspektov je zníženie účinnosti nabíjacieho cyklu pri zapojení viacerých batérií do série. Dochádza k nerovnomernému nabíjaniu jednotlivých akumuláčnych článkov a tým k postupnej degradácii výkonu a životnosti.

9 NÁVRH HYBRIDNÉHO FV SYSTÉMU

Riadiacim prvkom v tomto systéme bude hybridný striedač, ktorý zároveň obsahuje nabíjací obvod pre akumulátory s potrebnou logikou pre nabíjanie zo siete. Predpokladaným primárnym určením systému bude využívanie elektrickej energie z pripojených fotovoltaiických článkov s tým, že v čase vysokého tarifu bude v prevádzke režim, umožňujúci dobíjanie len z pripojeného fotovoltaiického zdroja. Dobíjanie zo siete bude umožnené len nízkotarifným prúdom z verejnej siete. Vzniknuté energetické prebytky, vznikajúce v čase plného nabitia batérií, sa budú odpredávať do siete za zmluvnú cenu.

9.1 . Popis riešeného objektu pre návrh FV elektrárne

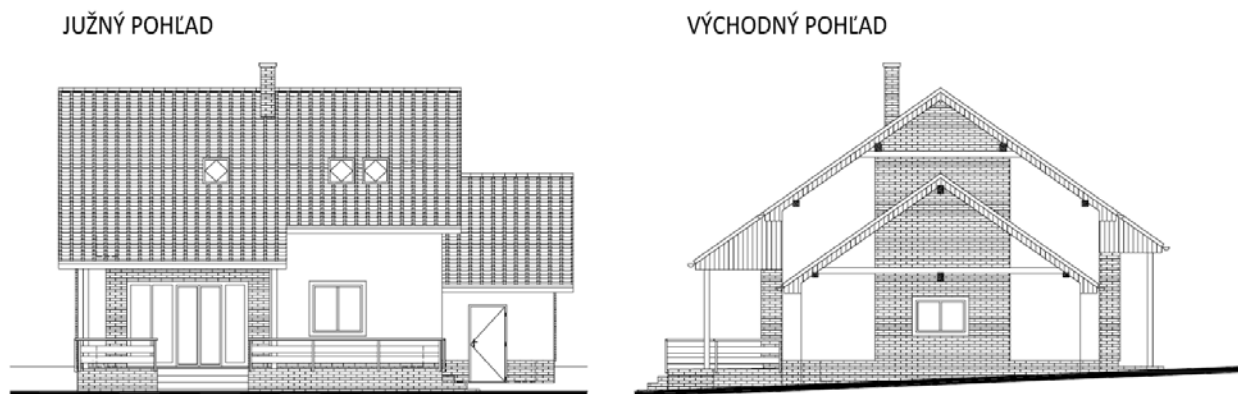
Jedná sa o samostatne stojaci rodinný dom pre štyri osoby, situovaný v mestskej časti Praha 8 – Ďáblice. Má jedno obytné podlažie a čiastočne obytné podkrovie s celkovou podlahovou plochou 165 m². K objektu priliehajúca technická miestnosť s podkrovným priestorom bude vykurovaná na cca 20 °C. Budova má šikmú sedlovú strechu o výške 8,0 m, sklonom 35° a 6° odklonením od juhu.



Obr. 9-1 Situačná mapa riešeného objektu

Rodinný dom spadá do triedy LPS III, ako zberné zariadenie je použitý tyčový oddialený hromozvod, pričom do ochranného uhla 77,2° spadá komín a navrhované umiestnenie fotovoltaiických panelov na streche. Uzemňovacia sústava je prevedená ako typ B – základový zemnič, čo je mreža zaliata v betónových základoch stavby.

Podľa triedy LPS sú navrhnuté na strechu štyri zvody. Zberná tyč s výškou 1,15 m spolu so zvodmi sú z pozinkovanej ocele o priereze 8 mm². Zvolená bezpečnostná vzdialenosť od fotovoltaických panelov je 0,3 m. Objekt bol vyhodnotený z hľadiska energetickej náročnosti ako veľmi úsporný, v súlade s požiadavkami zákona č. 406/2000 Zb. v neskoršom znení vyhlášky k § 6a tohto zákona, vyhlášky č. 148/2007 Zb., o energetickej náročnosti budov.



Obr. 9-2 Južný a východný pohľad riešeného objektu

9.2 . Popis energetickej náročnosti objektu

Ako zdroj tepla pre vykurovanie objektu a ohrev teplej vody je použité invertorové tepelné čerpadlo Rotex HPSU 6 kW vzduch / voda s integrovaným elektrokotlom. To umožňuje odber nočného prúdu, resp. objekt môže odberať silovú energiu v dvojtarifnej sadzbe. Pripojenie tepelného čerpadla je prevedené samostatným prívodom ktorý je spínaný stykačom. Ovládanie stykača je zabezpečené signálom z prijímača HDO osadeným do hlavného domového rozvádzača. Prívod pre vnútornú jednotku tepelného čerpadla je realizovaný CYKY 5Cx2,5. Zdrojom teplej vody je zásobníkový ohrievač o objeme 200 litrov, tento bude nahrievaný tepelným čerpadlom. Vykurovacia plocha v objekte je tvorená podlahovým vykurovaním v kombinácii s vykurovacími telesami.

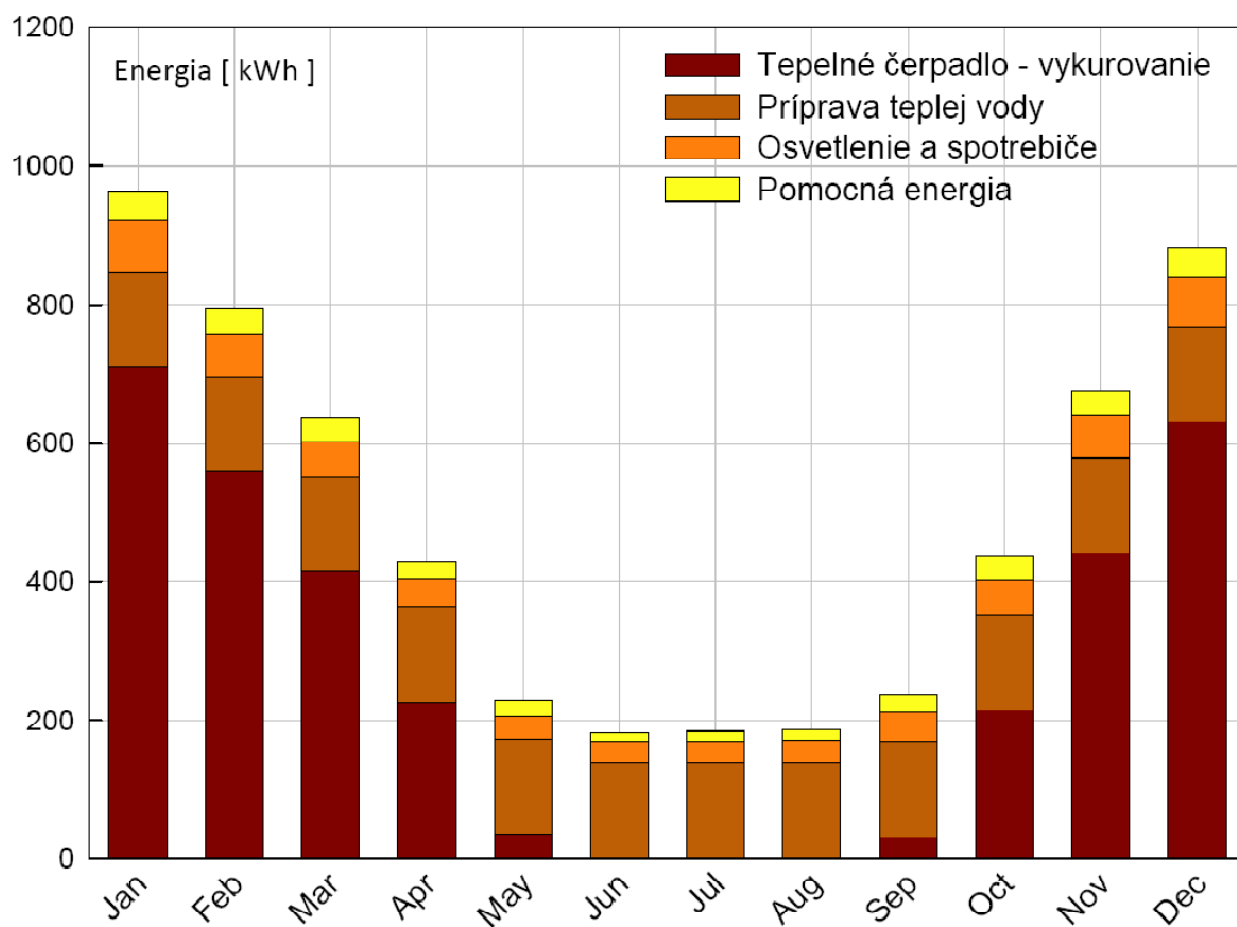
Tab. 9-1 Dodaná energia do objektu pre jednotlivé systémy za rok

Popis jednotlivých systémov	Dodaná energia	Merná dodaná energia	Percentuálne podiely
Systém vykurovania	3268 kWh	19,8 kWh/(m ² .rok)	56,0 %
Systém prípravy teplej vody	1641 kWh	9,9 kWh/(m ² .rok)	28,1 %
Osvetlenie a el. spotrebiče	592 kWh	3,6 kWh/(m ² .rok)	10,1 %
Pomocná energia	336 kWh	2,0 kWh/(m ² .rok)	5,8 %
spolu	5832,1 kWh	35,4 kWh/(m ² .rok)	100 %

Tab. 9-2 Celková ročná spotrebovaná energia objektu

Mesiac [–]	Vykurovanie [kWh]	Príprava teplej vody [kWh]	Osvetlenie a spotrebiče [kWh]	Pomocná energia ^a [kWh]	Spolu [kWh]
Január	710.8	136.6	75.0	40.2	962.6
Február	559.7	136.6	61.6	36.3	794.2
Marec	414.2	136.6	51.3	32.5	635.1
Apríl	226.2	136.6	42.0	24.1	428.8
Máj	36.1	136.6	34.4	22.5	229.6
Jún	0	136.6	31.9	14.4	182.9
Júl	0	136.6	31.9	15.0	183.5
August	0	136.6	34.4	15.0	186.0
September	32.5	136.6	43.0	24.1	236.1
Október	215	136.6	50.8	35.0	437.4
November	442.2	136.6	61.1	36.3	676.2
December	630.5	136.6	73.8	40.2	880.7
Spolu	3268,1	1639,2	591,2	336	5832,1

^a Pomocná energia zahrnuje systém MaR, príkon pre obehové čerpadlá



Obr. 9-3 Graf energetickej náročnosti jednotlivých systémov podľa tab. 9–2 za jeden rok

9.3 . Návrh inštalovaného výkonu pre hybridný systém

Hybridná fotovoltaiická elektráreň je navrhnutá k inštalácii na strechu rodinného domu. Predpokladáme napojenie podzemným vedením NN do energetickej distribučnej siete PRE distribúcia, a. s. prostredníctvom už existujúcej elektrickej prípojky v objekte.

Tab. 9-3 Základné technické informácie distribučnej a rozvodnej sústavy

napäťová sústava pripojovacia	3+PEN ~ 230/400V, 50Hz, TN-C
rozvodná sústava v dome	3+PE+N ~ 230/400, 50Hz, TN-C-S
stupeň dôležitosti dodávky podľa	stupeň 3
prívodný kábel	4B x 10 mm ²

Keďže hybridný systém bude dotovaný formou zelených bonusov, návrh sa bude odvíjať od dennej, resp. mesačnej spotreby uvažovaného objektu s prihliadnutím na plochu strechy. Pre inštaláciu fotovoltaiických panelov budeme zvažovať len južnú stranu strechy s vylúčením priliehajúcej technickej miestnosti z dôvodu zatienenia tejto časti. Teda celková teoretická plocha je približne 60 m². Ako vidíme v tab. 9–4, tejto hodnote zodpovedá teoretický inštalovaný výkon 8 kWp. Musíme si však uvedomiť, že na streche sa nachádza komín a strešné okná, ktoré znemožňujú optimálne umiestnenie a teda znižujú maximálny možný inštalovaný výkon.

Tab. 9-4 Prehľad potrebných plôch pre inštaláciu fotovoltaiického systému

Popis typu strechy	5 kWp	8 kWp	9,5 kWp	12 kWp	14,5 kWp	18,5 kWp	24 kWp	30 kWp
Šikmá strecha	36 m ²	60 m ²	70 m ²	90 m ²	105 m ²	135 m ²	175 m ²	215 m ²
Plochá strecha	60 m ²	100 m ²	130 m ²	150 m ²	170 m ²	220 m ²	250 m ²	300 m ²

^a U plochej strechy sú hodnoty orientačné, záleží na pomere výšky a šírky danej strechy

Celková potrebná energia dodaná pre jednotlivé systémy objektu je podľa tab. 9–2 5832,1kWh. V závislosti od týchto skutočností budeme navrhovať systém s výkonom, ktorý bude pokrývať energetické požiadavky väčšiny systémov, s vylúčením systému vykurovania, tvoriaceho 56 % z celkovej energetickej potreby. Teda minimálna navrhovaná hodnota by mala byť 2,6 kWp. Ďalším z parametrov, ku ktorému musíme pri navrhovaní prihliadať, je výkonová rada dostupných hybridných meničov a regulátorov nabíjania. Navrhovaný výkon fotovoltaiického pola bude 3,5 kWp. Táto hodnota rešpektuje výstupný výkon hybridného striedača s tým, že po dobu 30 min. je dostupná 500 W rezerva. Pravidlá distribútora PRE distribúcie a.s. týkajúce sa paralelného chodu zdrojov v sieti definujú maximálnu hodnotu pripájaného výkonu pre fotovoltaiické systémy. To je pre návrh hybridného systému tiež jeden z kľúčových faktorov. Pre fotovoltaiické systémy pripájané do sietí nízkeho napätia je obmedzený výkon pri jednofázovom pripojení v jednom prípojnóm bode na 4,6 kVA na jednu fázu, nesymetria u fázových vodičov nesmie za normálneho prevádzkového stavu prekročiť 4,6 kVA. U fotovoltaiických systémov do výkonu 4,6 kVA na fázu sa kompenzácia účinníku neuvažuje. Pre potreby ekonomickej analýzy a porovnanie hybridného systému simulujeme aj on-grid systém s rovnakými parametrami fotovoltaiického pola, s vylúčením akumulátorov a regulátoru nabíjania. Namiesto hybridného striedača bude použitý odpovedajúci štandardný striedač napríklad od firmy SMA

Tab. 9-5 Základný prehľad simulovaných fotovoltaických systémov

Popis jednotlivých komponentov	Hybridný systém	On-grid systém
Typ FV panela	SunWays SM230MD1A	SunWays SM230MD1A 230Wp
Nominálny výkon FV pola	3,5 kWp	3,5 kWp
Celkový počet modulov	15	15
Panelov v sérii	3	15
Paralelne strngov	5	1
Striedač	Studer Innotec XTM 4000-48	Fronius IG TL 3,6
Typ akumulátoru	FG12-100DG	-
Typ regulátoru nabíjania	TriStar MPPT-60	-

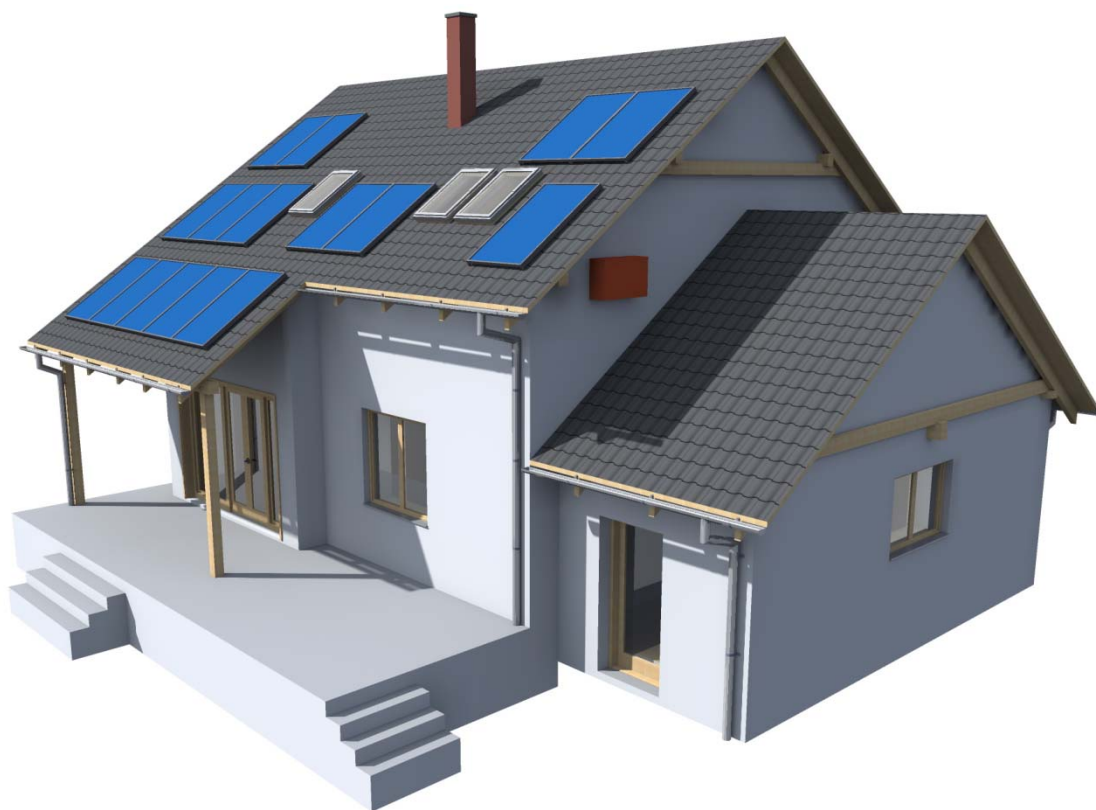
Pre simuláciu bola použitá demo verzia programu PVsyst, umožňujúca simulovať chod po dobu 12 mesiacov s meteorologickými údajmi pre lokalitu Praha okolie z roku 1990. Program PVsyst umožňuje komplexný návrh fotovoltaických systémov s akumulačným prvkom a typu on-grid. Je možné nakonfigurovať parametre vlastného fotovoltaického panelu a ďalších komponentov, z ktorých pozostáva daný typ riešeného systému. Výstupy sú interpretované v podobe tabuliek a grafov, tie poskytujú širší náhľad na navrhovaný systém. Tabuľky a grafy popisujúce energetické toky pre jednotlivé systémy sú výstupmi z tohto programu.



Obr. 9-4 Rozvrhnutie fotovoltaických panelov na streche riešeného objektu



Obr. 9-5 Juhozápadný pohľad na vizualizáciu rozmiestnenia fotovoltických panelov



Obr. 9-6 Juhovýchodný pohľad na vizualizáciu rozmiestnenia fotovoltických panelov

9.4 Základné prvky navrhovaného hybridného FV systému

Ako regulátor nabíjania je použitý TriStar MPPT – 60. Tento solárny regulátor má zabudovanú technológiu sledovania bodu maximálneho výkonu - maximum power point tracking (MPPT) a nabíjač batérií pre fotovoltaické systémy. Použitý softwarový algoritmus pre MPPT zaisťuje vyťaženosť energie až o 30% vyššiu v zrovnaní s regulátormi bez MPPT. MPPT funguje pomocou rýchleho vyhľadávacieho algoritmu, ktorý maximalizuje zisk energie z fotovoltaického panelu tým, že vyhľadáva bod maximálneho výkonu na I –V charakteristike. Regulátor je vybavený ochranou proti preťaženiu, skratu, vysokému napätiu, prehriatiu, blesku, prechodovým javom a reverzným prúdom.



Tab. 9-6 Technické údaje regulátoru nabíjania TriStar MPPT–60

Komunikácia M-Bus	RS – 232
Systémové napätie ^a	48 V
Regulovaný prúd ^a	60 A
Max. napätie ^a solárneho pola V_{oc}	150 V
Rozmery [mm]	291 x 190 x 142
Hmotnosť	4,2 kg

^a jednosmerné

Obr. 9-7 Regulátor nabíjania TriStar MPPT – 60 [16]

Ako striedač je navrhnutý hybridný menič STUDER XTM 4000–48 švajčiarskej výroby s nominálnym výkonom 3,5 kW s možnosťou 30 minútových špičiek 4000 W. Systém je ideálny pre rýchlu inštaláciu pri požiadavkách na stredne veľký výkon. Návrh systému je extrémne kompaktný a obsahuje aj inštalčné príslušenstvo ako upínacie svorky a predpripravené rozvody. Jedná sa teda o plne integrovaný systém produkujúci čistú sínusovku. Systém je možné ďalej doplniť o prvky pre vzdialenú reguláciu, komunikáciu a monitoring.



Tab. 9-7 Parametre hybridného striedača Studer Innotec XTM 4000-48

Menovité výstupné napätie	230 V ($\pm 2\%$)
Harmonické skreslenie	< 2%
Menovitý výstupný výkon @25°C	3500 VA
Výstupný výkon po dobu 30min @25°C	4000 VA
Menovité napätie batérií	48 V
Výstupné napätie regulátoru nabíjania	38 -68 V
Maximálny nabíjací prúd	50 A
Rozmery [mm]	466 x 322 x 133
Hmotnosť	22,9 kg

^a striedavé , čistá sínusovka

Obr. 9-8 Hybridný striedač Studer Innotec XTM 4000–48 [17]

FG12-100DG je gélový bezúdržbový akumulátor o napätí 12V a kapacite 100Ah s dobou vybíjania 20 hodín. Je vhodný pre napájanie cyklických aplikácií a prioritne je navrhnutý pre použitie v solárnych systémoch. Celková navrhovaná kapacita prúdu je 200 Ah, resp. batériové pole je schopné udržať 9,6kWh na napäťovej úrovni 48V. V budúcnosti je možné ďalšie rozšírenie v prípade, že sa to ukáže ako vhodné pre lepšiu využiteľnosť systému.



Tab. 9-8 Technické údaje solárneho gélového akumulátora FG12–100DG

Menovité napätie	12 V
Menovitá kapacita	100 Ah
Životnosť pri 50% hĺbke vybitia	1000 cyklov
Životnosť pri 80% hĺbke vybitia	700 cyklov
Rozmery [mm]	222 x 172 x 328
Hmotnosť	30,0 kg

Obr. 9-9 Solárny gélový akumulátor FG12–100DG [18]

Po preskúmaní trhu bol vybraný panel Sunways SM230MD1A vyznačujúci sa špičkovým spracovaním, kvalitou a dostupnosťou (Brnenská firma Sunlux). Panely sú certifikované pre použitie v štátoch Európskej únie. Výrobca garantuje minimálne 90% pôvodnej hodnoty výkonu po dobu dvanástich rokov a 80% pôvodnej hodnoty po dobu dvadsaťpäť rokov.



Tab. 9-9 Parametre FV panelu SunWays SM230MD1A

Maximálny výkon P_m	230 [Wp]
Multiplikačné napätie U_m	31,8 [V]
Multiplikačný prúd I_{mpp}	7.23 [A]
Prúd nakrátko I_{sc}	8.21 [A]
Napätie naprázdno U_{oc}	37.2V
Teplotný koeficient pre I_{sc}	0,06 [%/°C]
Teplotný koeficient pre U_{oc}	-0,33 [%/°C]
Teplotný koeficient pre P_{mpp}	-0,44 [%/°C]
Rozmery [mm]	1642 x 994 x 40
Hmotnosť	20 kg

^a hodnoty pri 1000 W/m² a teplote 25 °C

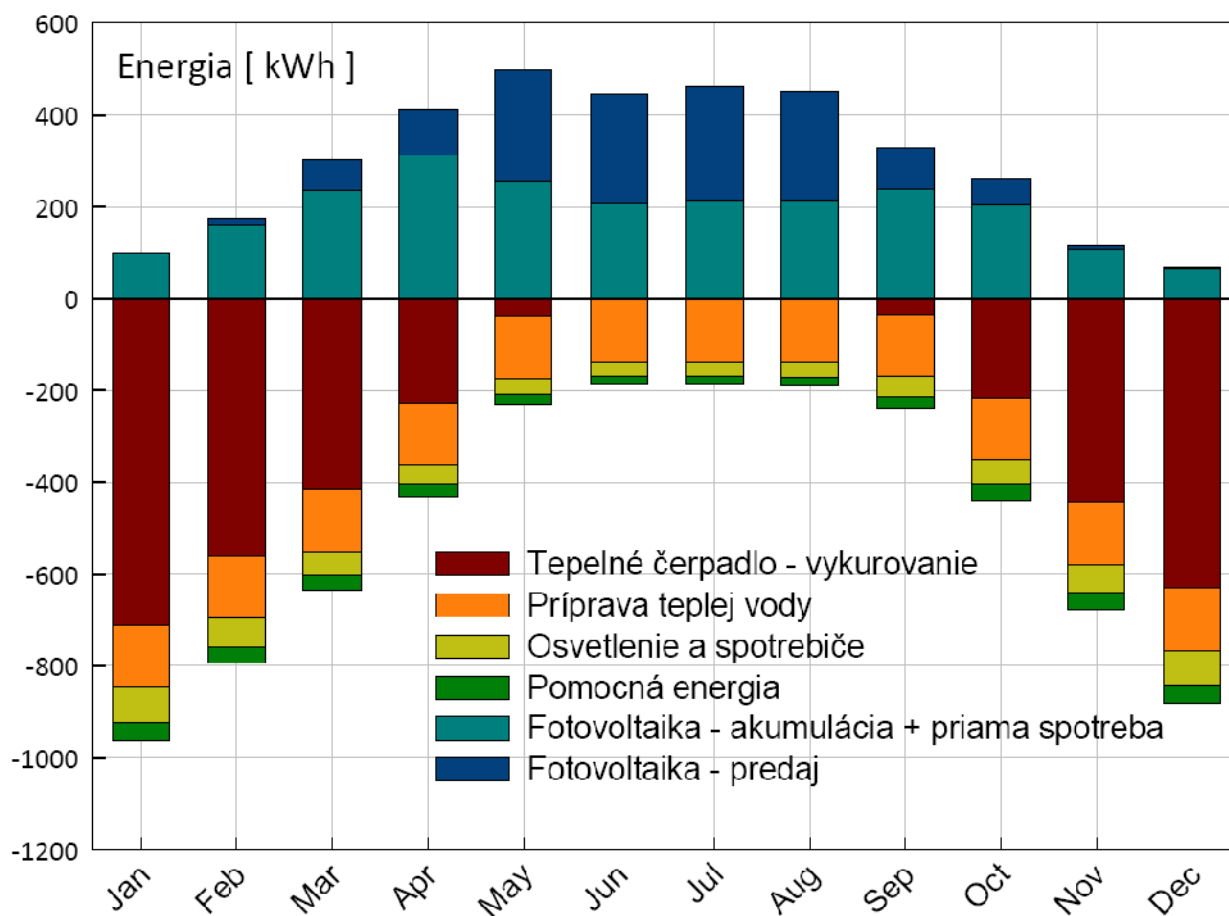
Obr. 9-10 FV panel SunWays SM230MD1A [19]

9.5 Ročná energetická bilancia navrhovaného hybridného systému

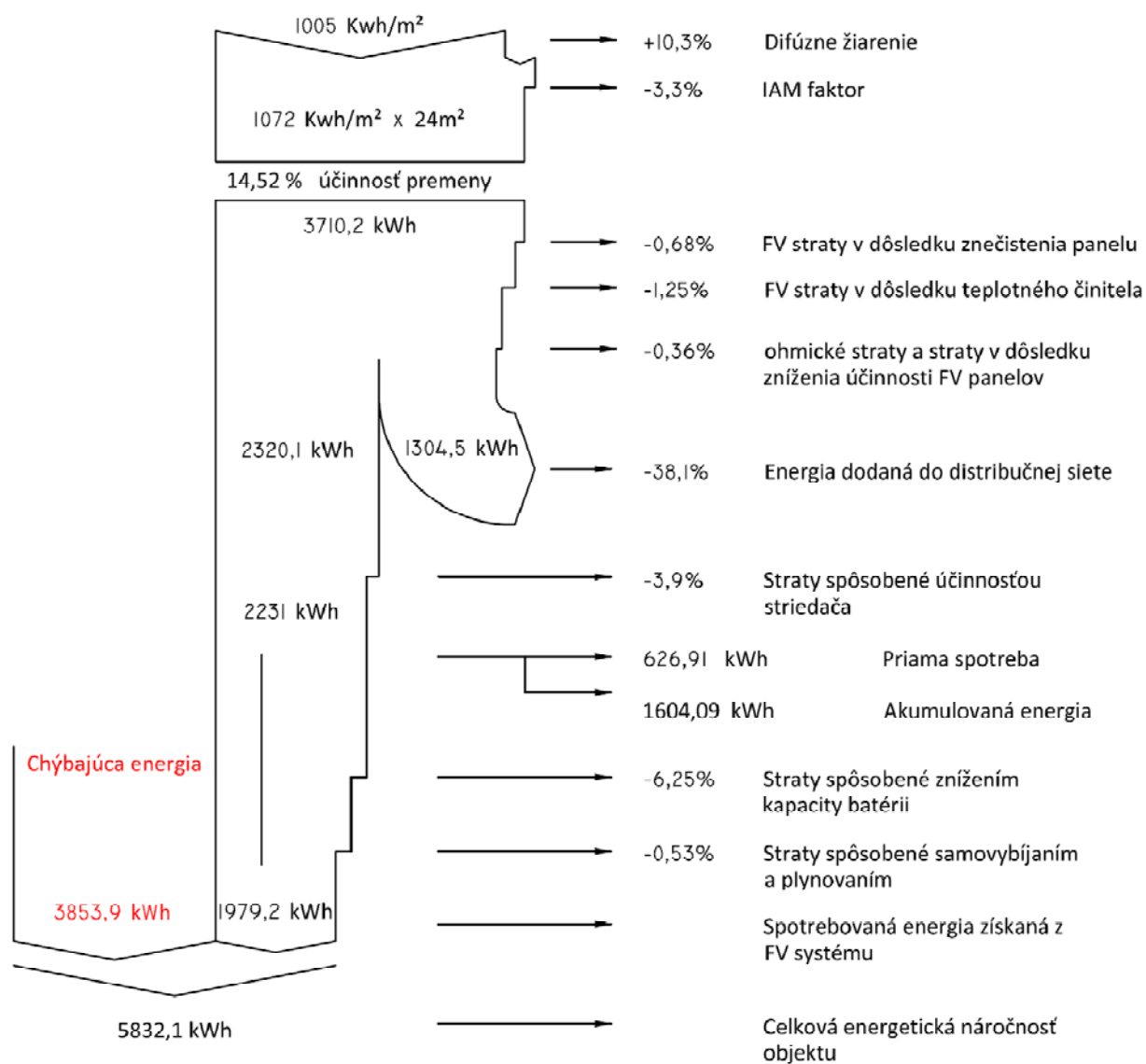
Tab. 9-10 Energetická bilancia navrhnutého hybridného systému v jednotlivých mesiacoch roka

Mesiac [–]	Vyrobená energia ^a [kWh]	Do siete [kWh]	Energia do systému [kWh]	Spotrebovaná [kWh]	Chýbajúca energia [kWh]
Január	102,67	1,00	98,20	77,0	885,6
Február	181,14	16,70	158,70	124,2	670
Marec	310,88	65,40	236,70	201,3	433,8
Apríl	423,62	99,20	312,50	273,5	155,3
Máj	507,66	242,30	255,80	223,9	5,7
Jún	453,85	237,50	208,80	182,9	0
Júl	470,60	247,90	214,90	189,0	-5,5
August	459,71	235,30	216,40	192,0	-6
September	337,36	88,60	239,70	217,6	18,5
Október	268,43	56,80	204,00	171,3	266,1
November	121,71	10,30	107,60	76,9	599,3
December	72,59	3,50	66,80	49,6	831,1
Spolu	3710,22	1304,5	2320,1	1979,2	3853,9

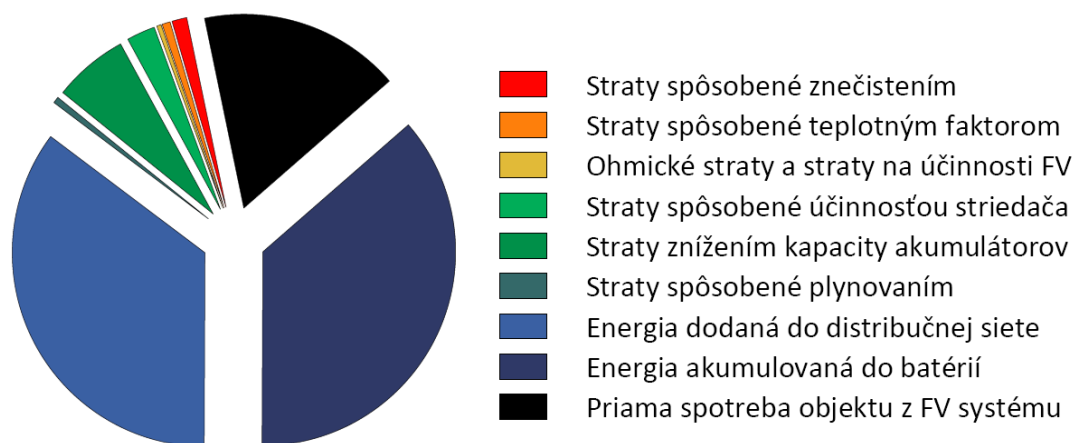
^a Jedná sa teoreticky vyrobenú energiu vystupujúcu z FV pola nezaťaženú stratami



Obr. 9-11 Ročná energetická bilancia podľa tab. 9–10 pre navrhovaný hybridný systém



Obr. 9-12 Diagram energetického toku hybridného systému za obdobie jeden rok



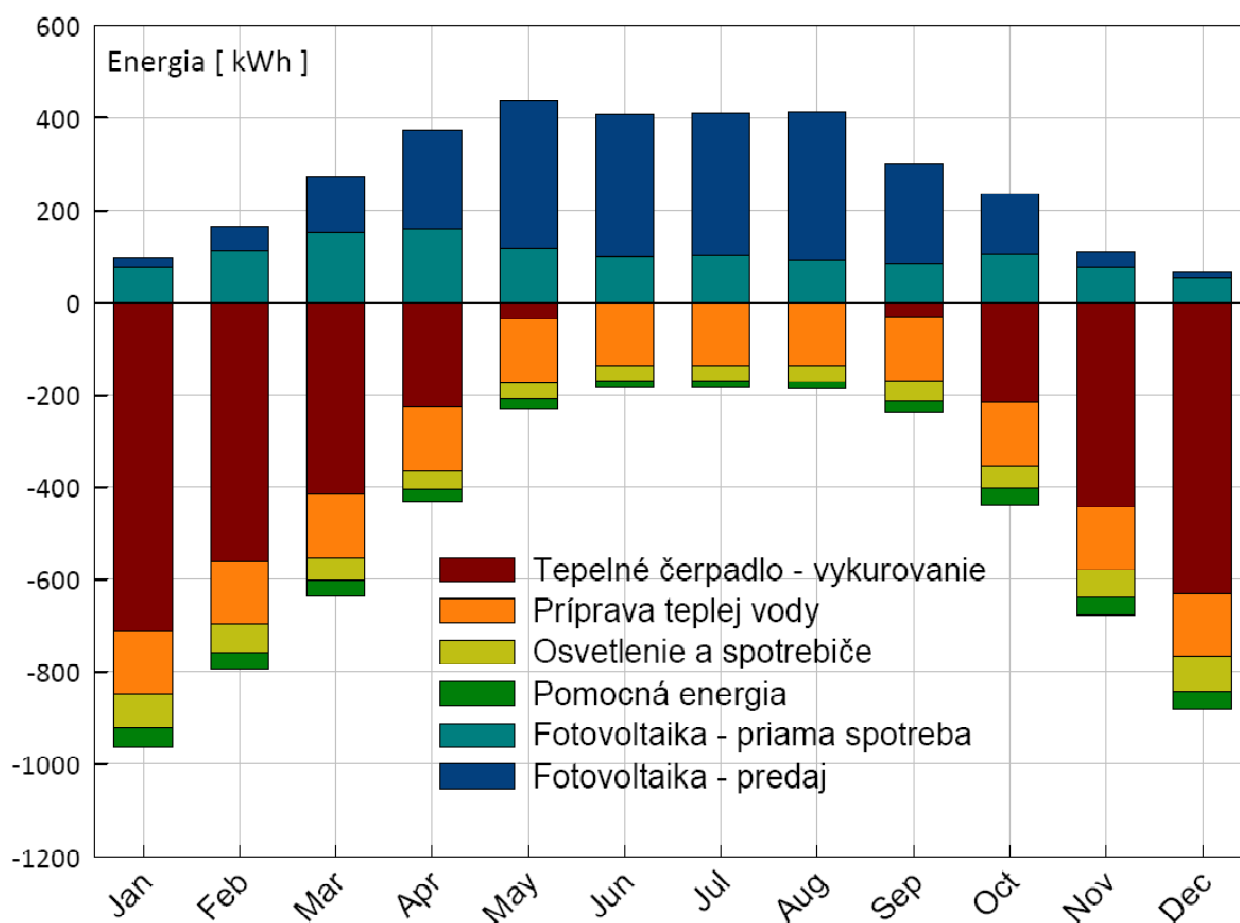
Obr. 9-13 Koláčový graf rozdelenia energetického toku pre hybridný systém

9.6 Ročná energetická bilancia porovnávaného on-grid systému

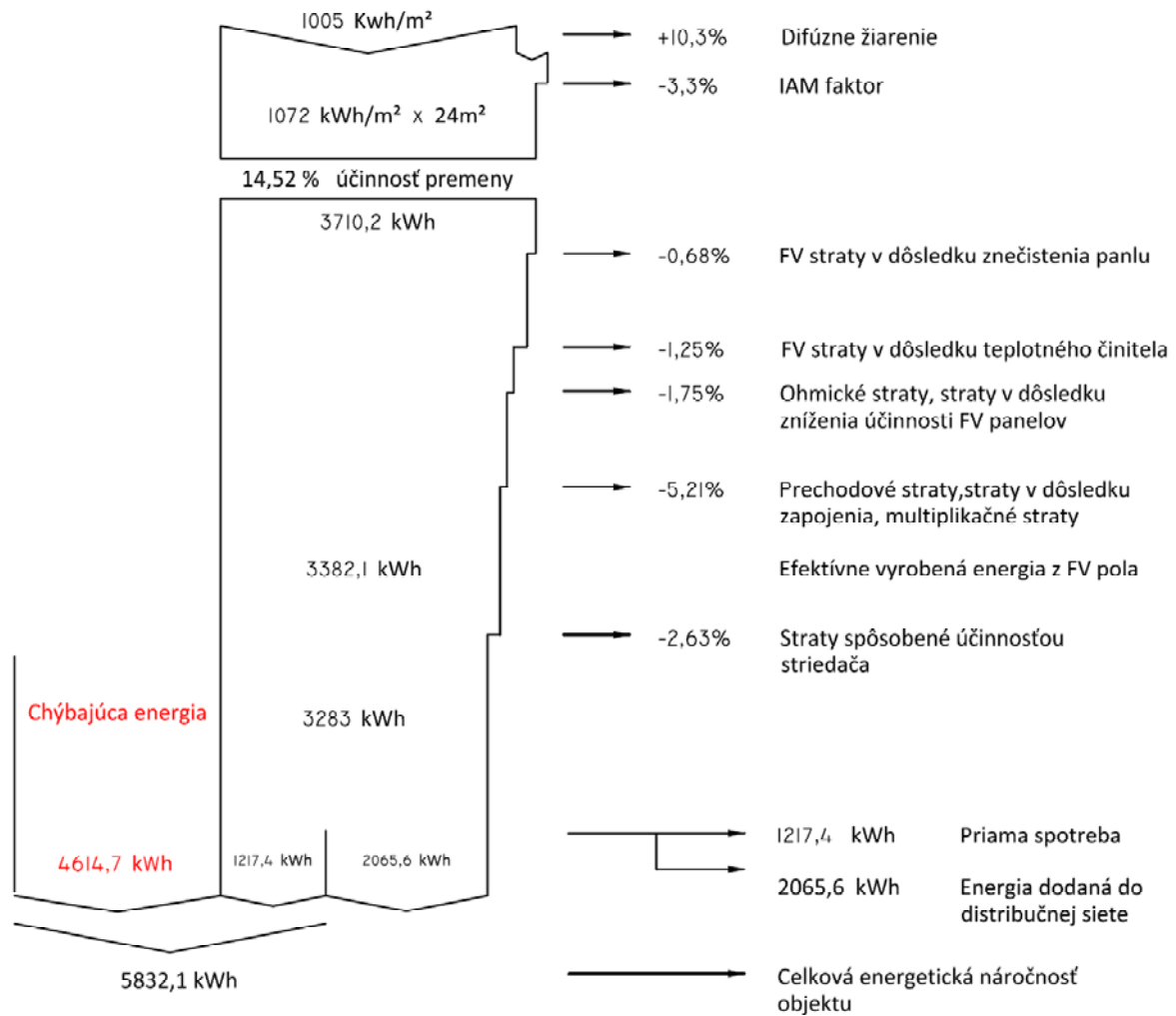
Tab. 9-11 Energetická bilancia porovnávaného on – grid systému v jednotlivých mesiacoch roka

Mesiac [–]	Vyrobená energia ^a [kWh]	Energia do siete [kWh]	Spotrebovaná energia [kWh]	Chýbajúca energia [kWh]
Január	101,2	21,8	75,2	887,4
Február	170	54,1	110,4	683,8
Marec	279,4	120,8	150,5	484,6
Apríl	383,5	215,3	157,7	271,1
Máj	448,8	321,1	115,6	114
Jún	419	308,7	98,6	84,3
Júl	420,6	307,6	101,4	82,1
August	423,7	321,3	91	95
September	308,8	217,1	82,9	153,2
Október	242,5	130,4	104,9	332,5
November	114,4	34,9	75	601,2
December	70,3	12,2	54,3	826,4
Spolu	3382,1	2065,6	1217,4	4615,7

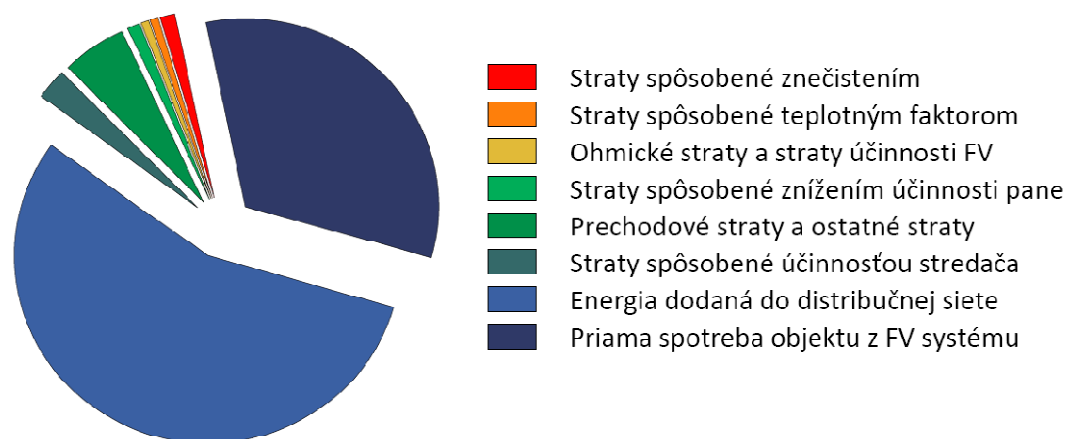
^a Jedná sa o efektívne vyrobenú energiu vystupujúcu z FV pola



Obr. 9-14 Ročná energetická bilancia podľa tab. 9–11 pre zrovnávaný on-grid systém

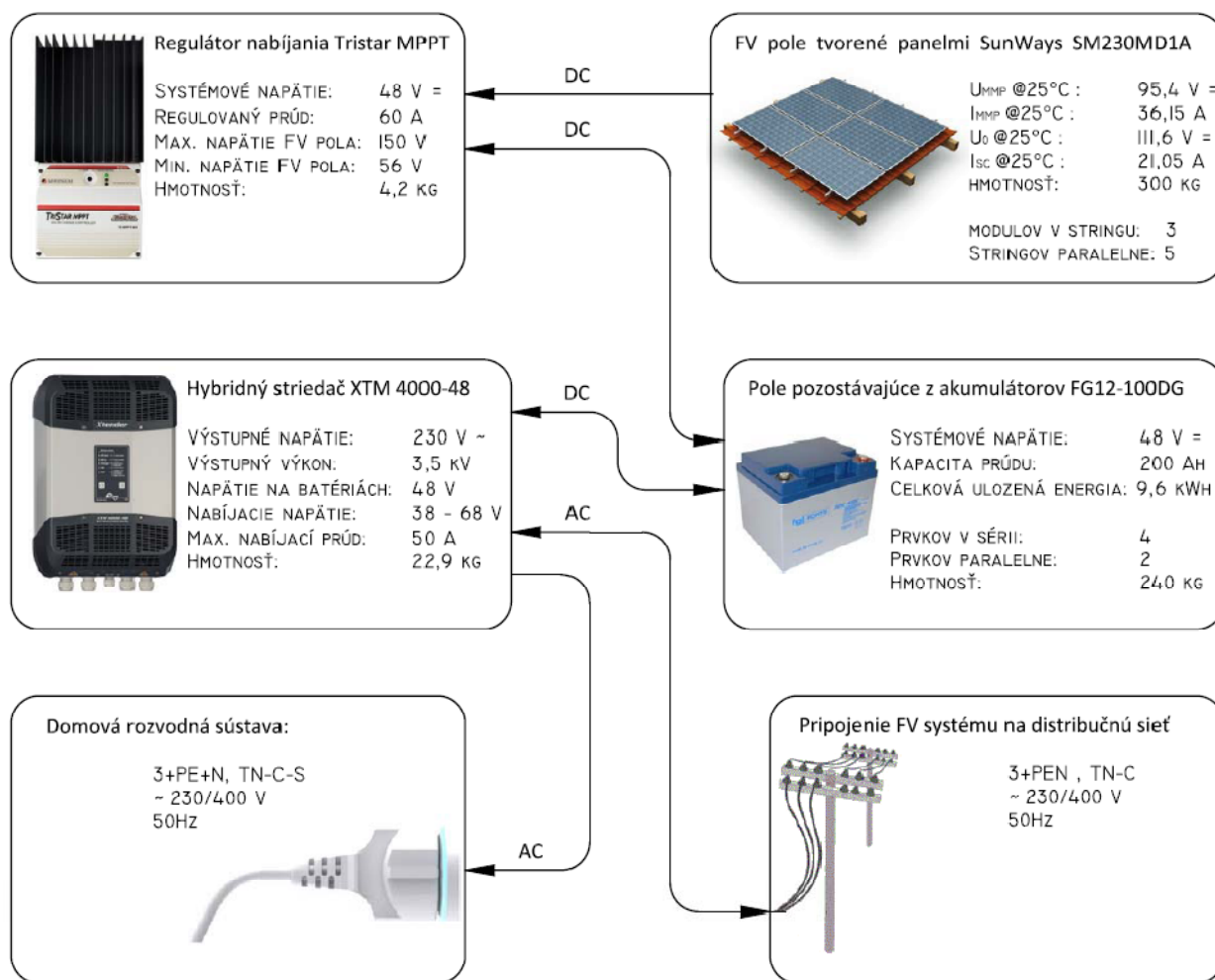


Obr. 9-15 Diagram energetickeho toku on-grid systému za obdobie jeden rok



Obr. 9-16 Koláčový graf rozdelenia energetickeho toku pre on-grid systém

Výstupy zo simulácií pre uvažované varianty ukazujú, že hybridný systém poskytuje v priebehu jedného roka takmer štvormesačnú energetickú nezávislosť pri plánovanom rozdelení energetickej náročnosti objektu. Ako je patrné z koláčového grafu pre hybridný systém, až 40 % vyrobenej energie sa akumuluje do batérií. V prípade hybridného systému ide energetický tok primárne cez batérie, takže priama spotreba pre hybrid je definovaná ako stav plného nabitia, kedy je zároveň ešte dostatočná výroba na pokrytie aktuálnej spotreby. On-grid systém neposkytuje ani v letných mesiacoch, kedy je spotreba najnižšia, úplnú energetickú nezávislosť. Rozdiel spotrebovanej energie získanej z fotovoltaiického systému medzi hybridným a on-grid zapojením je viac ako 700 kWh v prospech hybridného zapojenia.



Obr. 9-17 Bloková schéma pre navrhovaný hybridný systém

Obr. 9-15 zobrazuje blokové zapojenie hlavných prvkov hybridného fotovoltaiického systému a ich napojenie na distribučnú a domovú rozvodnú sieť. Pre zvýšenie prehľadnosti sú v každom bloku uvedené základné technické parametre daného člena. Podrobné jednopólové schéma pre hybridný systém je zahrnuté v prílohe A.



Obr. 9-18 Rez technickou miestnosťou riešeného objektu

Tab. 9-12 Popis označených prvkov hybridného systému pre obr. 9–18.

Číselné označenie prvkov hybridného	Popis jednotlivých prvkov
1	Zlučovací box
2	Regulátoru nabíjania TriStar MPPT–60
3	Hybridný striedač Studer Innotec XTM 4000-48
4	Gélové akumulátory FG12–100DG
5	Rozpadové miesto
6	Domový rozvádzač

Obrázok 9–18 znázorňuje rez technickou miestnosťou riešeného objektu. Ukazuje rozvrhnutie jednotlivých prvkov navrhovaného hybridného fotovoltaiického systému. Pod krovom strechy je umiestnený zlučovací box v ktorom sa spájajú jednotlivé stringy. Zlučovací box je prepojený s regulátorom nabíjania, ktorý je spojený s batériami. Batériové pole je prepojené s hybridným meničom ktorého výstup ústi k rozpadovému miestu. Posledným členom je rozvádzač ktorý je napojený na distribučnú sieť. Jednotlivé prvky sú reprezentované očíslovanými boxami spolu s príslušnými ochranami z dôvodu zachovania prehľadnosti.

10 EKONOMICKÉ ZHODNOTENIE

Ekonomické zhodnotenie je neoddeliteľnou súčasťou každého projektu. Investora predovšetkým zaujíma, akým spôsobom budú zhodnotené jeho investície, a samozrejme tiež, za ako dlho sa mu vložené prostriedky vrátia. Najrýchlejší spôsob ako odpovedať na položené otázky je využitie statických metód hodnotenia efektívnosti investícií. Do tejto kategórie spadá priemerný ročný peňažný tok a doba návratnosti investície. Značná nevýhoda týchto metód je absencia faktorov zohľadňujúcich čas a riziko. Zakomponovanie časového faktoru spresní určenie výnosov za dobu životnosti investície. Vhodnejšími metódami hodnotenia efektívnosti investícií sú metódy dynamické. Môžu zahŕňať metódy ako napríklad čistá súčasná hodnota, index rentability, prípadne vnútorné výnosové percento. Tieto metódy kompenzujú nedostatky statických metód a majú väčšiu vypovedajúcu hodnotu.

10.1 Ekonomické vstupy riešených návrhov

V tejto časti sú v tabuľkách zhrnuté investičné náklady, ročné prevádzkové náklady a výnosy pre uvažovaný hybridný a on-grid systém. Kalkulácia ročných výnosov vychádza zo simulácií z prechádzajúcej kapitoly. Z dôvodu softwarového obmedzenia budeme uvažovať ročný energetický zisk pre rok 1990.

Tab. 10-1 Celkový prehľad nákladov a výnosov pre hybrid a on-grid systém

Popis jednotlivých nákladov a výnosov	Hybridný systém	On-grid systém
Investičné náklady [Kč]	242715	181715
Ročné prevádzkové náklady [Kč]	4004,8	2998,3
Ročné výnosy [Kč]	24309,6	22671,8

Tab. 10-2 Rozpočet investičných nákladov pre hybridný FV systém^a

Popis použitých komponentov	Počet kusov	Jednotková cena ^c [Kč]	Cena ^c [Kč]
FV panely SunWays SM230MD1A	15	5681	85215
Hybridný striedač Studer Innotec XTM 4000-48	1	45000	45000
Regulátoru nabíjania TriStar MPPT-60	1	11000	11000
Gélový akumulátor FG12-100DG	8	5000	40000
Elektroprojekt spadajúci do 10kW	1	3500	3500
Napäťová a frekvenčná ochrana	1	6900	6900
Jednosmerná kabeláž, konektory, rozvádzač s elektromerom, elektroinštalačný a elektromontážny materiál	3,5	8500 ^b	29750
Systém pre upevnenie panelov na strechu ^c	3,5	6100 ^b	21350
spolu	-	-	242715

^a jedná sa o orientačné ceny poskytnuté firmou Sunlux s.r.o.

^b jedná sa o cenu za jeden kWp

^c cena bez DPH

Tab. 10-3 Ročné výnosy pre hybridný systém^a

Popis výnosov a ziskov	Energia vyrobená za rok [kWh]	Cena za kWh [Kč]	Celkovo [Kč]
Výnos formou zeleného bonusu	3624,6	5,08	18412,9
Výnos formou priameho predaja	1304,5	0,5 ^a	652,2
Zisk – nie je treba nákup energie	1979,2	2,65 ^b	5244,5
Spolu	-	-	24309,6

^a hodnota zvolená na základe odporúčania firmou Sunlux s.r.o.^b priemerná cena za kWh pre dvojtarifnú distribučnú sadzbuTab. 10-4 Rozpočet investičných nákladov pre on-grid FV systém^a

Popis použitých komponentov	Počet kusov	Jednotková cena ^c [Kč]	Cena ^c [Kč]
FV panely SunWays SM230MD1A	15	5681	85215
Fronius IG TL 3,6	1	35000	35000
Elektroprojekt spadajúci do 10kW	1	3500	3500
Napäťová a frekvenčná ochrana	1	6900	6900
Jednosmerná kabeláž, konektory, rozvádzač s elektromerom, elektroinštalačný a elektromontážny materiál	3,5	8500 ^b	29750
Systém pre upevnenie panelov na strechu ^c	3.5	6100 ^b	21350
spolu	-	-	181715

^a jedná sa o orientačné ceny poskytnuté firmou Sunlux s.r.o.^b jedná sa o cenu za jeden kWp^c cena bez DPHTab. 10-5 Ročné výnosy pre on-grid systém^a

Popis výnosov a ziskov	Energia [kWh]	Cena za kWh [Kč]	Celkovo [Kč]
Výnos formou zeleného bonusu	3624,6	5,08	18412,9
Výnos formou priameho predaja	2065,6	0,5 ^a	1032,8
Zisk – nie je treba nákup energie	1217,4	2,65 ^b	3226,1
Spolu	-	-	22671,8

^a hodnota zvolená na základe odporúčania firmou Sunlux s.r.o.^b priemerná cena za kWh pre dvojtarifnú distribučnú sadzbu

Tab. 10-6 Ročné prevádzkové náklady pre hybridný a on-grid systém

Popis nákladov	Hybridný systém	On-grid systém
Náklady na obsluhu a údržbu ^a [Kč]	3640,7	2725,7
Náklady na poistenie ^b [Kč]	364,1	272,6
Celkový úhrn [Kč]	4004,8	2998,3

^a počítame 1,5% z celkových investičných nákladov^b počítame 1,5% z celkových investičných nákladov

Zákon upravuje prevádzkovanie fotovoltaickej elektrárne ako príjem z podnikania a z inej samostatne zárobkovej činnosti, konkrétne sa jedná o podnikanie podľa zvláštného predpisu, ktorým je Energetický zákon. Tato činnosť je v zákone o daniach z príjmu definovaná v §7. odst. 1 písm. c) zákona o daniach z príjmu. Novelou zákona č. 348/2010 Zb., o daniach z príjmu, bolo

oslobodenie od dane zrušené, takže na navrhovaný FV systém sa nevzťahujú žiadne daňové úľavy. Vzhľadom na to, že fotovolaický systém výkonovo spadá do kategórie 30 kWp, nevzťahuje sa na neho solárna daň vo výške 26 %. Vo výpočte je v prvom roku uvažovaná 15% daň z príjmu, pre druhý až piaty rok 20 % a pre šiesty až dvadsiaty rok prevádzky 25 %. Majetok sa odpisuje rovnomerne, bez prerušenia, po dobu 240 mesiacov od uvedenia do prevádzky do 100 % vstupnej ceny.

Pre platenie sociálneho poistenia je rozhodujúce, či je prevádzkovanie fotovoltaiického systému vykonávané ako hlavná alebo vedľajšia činnosť. Vzhľadom na celkový výkon a koncepciu systému bude spadať do kategórie vedľajšej samostatnej zárobkovej činnosti. V tomto prípade je účasť na poistení závislá od výšky dosiahnutých príjmov po odpočte výdavkov, teda na výške dosiahnutého daňového základu. Pokiaľ daňový základ dosiahol rozhodnej čiastky podľa § 10 odst. 2 zákona o dôchodkovom poistení, je osoba samostatne zárobkovo činná povinná platiť poistné na sociálne poistenie. Rozhodná čiastka je definovaná ako 2,4 násobok priemernej mesačnej mzdy zistenej štatistickým úradom za kalendárny rok, ktorý o dva roky predchádza kalendárnemu roku, za ktorý sa posudzuje účasť na poistení a prepočítavacieho koeficientu pre úpravu tohto všeobecného vymeriavacieho základu. Predpokladané spustenie fotovoltaiického systému je naplánované na rok 2013. Priemerná mesačná mzda pre rok 2011 bola stanovená na 24319 Kč, teda rozhodná čiastka činí 58366 Kč. Vzhľadom na to, že daňový základ nepresiahne výšku rozhodnej čiastky, prevádzkovateľ bude oslobodený od platenia sociálneho poistenia.

Tab. 10-7 Prehľad peňažných tokov investície pre hybridný systém

Rok [–]	Ročný príjem [Kč]	Ročné [Kč]	Iné výdaje ^b [Kč]	Daň z príjmu [Kč]	CF ^a [Kč]	diskontované CF ^a [Kč]
2013	24310,09	4004,8	0	2250	23274	21751,09393
2014	24738,82	4004,8	0	1600	19134	16712,39728
2015	25176,18	4004,8	0	1600	19571	15976,07639
2016	25622,35	4004,8	0	1800	19818	15118,72115
2017	26077,55	4004,8	0	1800	20273	14454,19423
2018	26541,96	4004,8	0	2500	20037	13351,61067
2019	27015,80	4004,8	0	2500	20511	12773,22008
2020	27499,26	4004,8	0	2500	20994	12218,96821
2021	27992,56	4004,8	28000	0	-4012	-2182,388809
2022	28495,93	4004,8	0	0	24491	12450,05019
2023	29009,58	4004,8	0	1750	23255	11048,18006
2024	29533,74	4004,8	0	3250	22279	9892,118497
2025	30068,65	4004,8	0	3250	22814	9466,938573
2026	30614,54	4004,8	0	3500	23110	8962,358464
2027	31171,66	4004,8	0	3500	23667	8577,96216
2028	31740,26	4004,8	0	3750	23985	8124,707189
2029	32320,59	4004,8	0	3750	24566	7776,901739
2030	32912,91	4004,8	28000	0	908	268,6789356
2031	33517,49	4004,8	0	1250	28263	7814,870666
2032	34134,60	4004,8	0	4250	25880	6687,832576
Spolu	578494,62	80096	56000	44800	402817	211244,4922

^a Peňažný tok (Cash flow)

^b Peňažný výdaj týkajúci sa nákupu nových akumulačných prvkov

Tab. 10-8 Prehľad peňažných tokov investície pre on-grid systém

Rok [–]	Ročný príjem [Kč]	Ročné náklady [Kč]	Daň z príjmu [Kč]	CF ^a [Kč]	diskontované CF ^a [Kč]
2013	22671,87	2998	2250	17423,87	16283,99
2014	23030,16	2998	2000	18032,16	15749,99
2015	23394,86	2998	2200	18196,86	14854,06
2016	23766,09	2998	2200	18568,09	14165,50
2017	24143,97	2998	2200	18945,97	13508,21
2018	24528,64	2998	3000	18530,64	12347,74
2019	24920,22	2998	3000	18922,22	11783,80
2020	25318,84	2998	3000	19320,84	11244,90
2021	25724,64	2998	3250	19476,64	10594,00
2022	26137,75	2998	3250	19889,75	10110,94
2023	26558,32	2998	3500	20060,32	9530,51
2024	26986,49	2998	3500	20488,49	9097,13
2025	27422,40	2998	3750	20674,40	8579,14
2026	27866,20	2998	3750	21118,20	8190,00
2027	28318,04	2998	3750	21570,04	7817,97
2028	28778,08	2998	4000	21780,08	7377,66
2029	29246,48	2998	4000	22248,48	7043,29
2030	29723,38	2998	4250	22475,38	6649,65
2031	30208,97	2998	4250	22960,97	6348,89
2032	30703,39	2998	4500	23205,39	5996,71
Spolu	529448,86	59 960	65600	403888,86	207274,20

^a Peňažný tok (Cash flow)

Tab. 10-9 Spresňujúce parametre pre výpočet peňažných tokov

Popis parametrov	Hodnota	Jednotky
Rast ceny silovej energie	4	% / rok
Degradácia panelov	0,6	% / rok
Valorizácia výkupnej ceny pre zelený bonus	2	% / rok
Úroková sadzba p. a.	7	% /rok
Doba životnosti (hodnotenie)	20	rok
Financovanie z vlastných zdrojov vo výške 100 % z ceny investície	–	–

Tab. 10-10 Výsledky jednotlivých metód hodnotenia

Názov metódy hodnotenia	Jednotky	Hybridný systém	On-grid systém
Priemerný ročný diskontovaný peňažný tok	Kč	10562,22	10363,71
Čistá súčasná hodnota NPV ^a	Kč	- 31470,50	25559,20
Vnútné výnosové percento IRR ^b	%	5,29	8,66
Index ziskovosti ^c	–	0.86	1.14
Návratnosť investície ^d	roky	22,97	17.53

^a Rozdiel celkového diskontovaného peňažného toku a investičných nákladov^b Maximálna úroková miera, pri ktorej projekt ešte nie je stratový^c Podiel sumy diskontovaného peňažného toku a investičných nákladov^d Podiel investičných nákladov a priemerného ročného diskontovaného peňažného toku

Na základe výstupov, resp. návratnosti investície pri financovaní z vlastných zdrojov vo výške 100 % z investičných nákladov je financovanie pomocou úveru bezpredmetné z dôvodu neúmerneho zvýšenia skutočnej návratnosti investície.

Posúdenie metódou čistej súčasnej hodnoty udáva, o akú čiastku sa líši diskontovaný peňažný tok za dobu životnosti projektu a investičné prostriedky. Čím vyššia je táto hodnota, tým lepšie môžeme projekt hodnotiť. Ako je z tab. 10–10 patrné, pre hybridný systém vyšla táto hodnota záporná, čo naznačuje že návratnosť investície bude presahovať dvadsať rokov. Index ziskovosti je sprievodným ukazovateľom čistej súčasnej hodnoty a udáva, do akej výšky z vložených prostriedkov dosahuje súčasná hodnota budúcich peňažných tokov. V prípade, že index ziskovosti presiahne hodnotu jedna, je považovaný za prijateľný. Ďalším zo spôsobov hodnotenia investície je hodnotenie pomocou vnútorného výnosového percenta. Toto percento udáva výnosnosť projektu v prípade, keď sa čistá súčasná hodnota projektu rovná nule. Jedná sa teda o maximálnu úrokovú mieru, pri ktorej projekt ešte nie je stratový. Ak je výnosové percento vyššie ako úroková miera, v našom prípade 7%, je projekt ekonomicky prínosný. Posúdenie zvažovaných projektov jasne preukázalo, že on-grid systém je po ekonomickej stránke výhodnejší. Toto tvrdenie podporuje nižšia časová návratnosť investície, vyšší index ziskovosti a vyššia hodnota vnútorného výnosového percenta. Jediným aspektom, v ktorom hybridný systém prevyšuje variant on-grid je vo výške priemerného ročného diskontovaného peňažného toku. To zodpovedá predpokladu, že hybridný systém umožňuje vyšší podiel využitia vyrobenej energie a tým pádom aj vyššie príjmy spôsobené úsporou.

Pre komplexné posúdenie a zvýšenie objektívnosti bolo nutné vypracovať tzv. citlivostnú analýzu, ktorou bol skúmaný vplyv zmien vybraných vstupných hodnôt na celkovú ziskovosť projektu. Vychádzame pri tom zo skutočnosti, že na každý podnikateľský zámer pôsobí množstvo rizikových faktorov, ktorých výskyt môže v budúcnosti negatívne ovplyvniť celý projekt. Z toho dôvodu je nutné, aby sa pred samotnou realizáciou dôkladne zvažili všetky možné riziká, vrátane ich dopadov na výslednú podobu projektu. Vďaka citlivostnej analýze je možné kvantifikovať veľkosť zmeny výsledkov kritériálnych ukazovateľov pri určitej percentuálnej zmene rizikového faktora, a tiež zistiť tzv. zlomovú hodnotu, resp. odolnosť projektu voči danému riziku. Zlomová hodnota predstavuje maximálnu možnú percentuálnu hodnotu zmenu rizikového faktora pre udržanie efektívnosti projektu. Vzhľadom na skutočnosť, že koncepcia práce sa zameriava na hybridný systém, citlivostná analýza bude spracovaná len pre hybridný návrh.

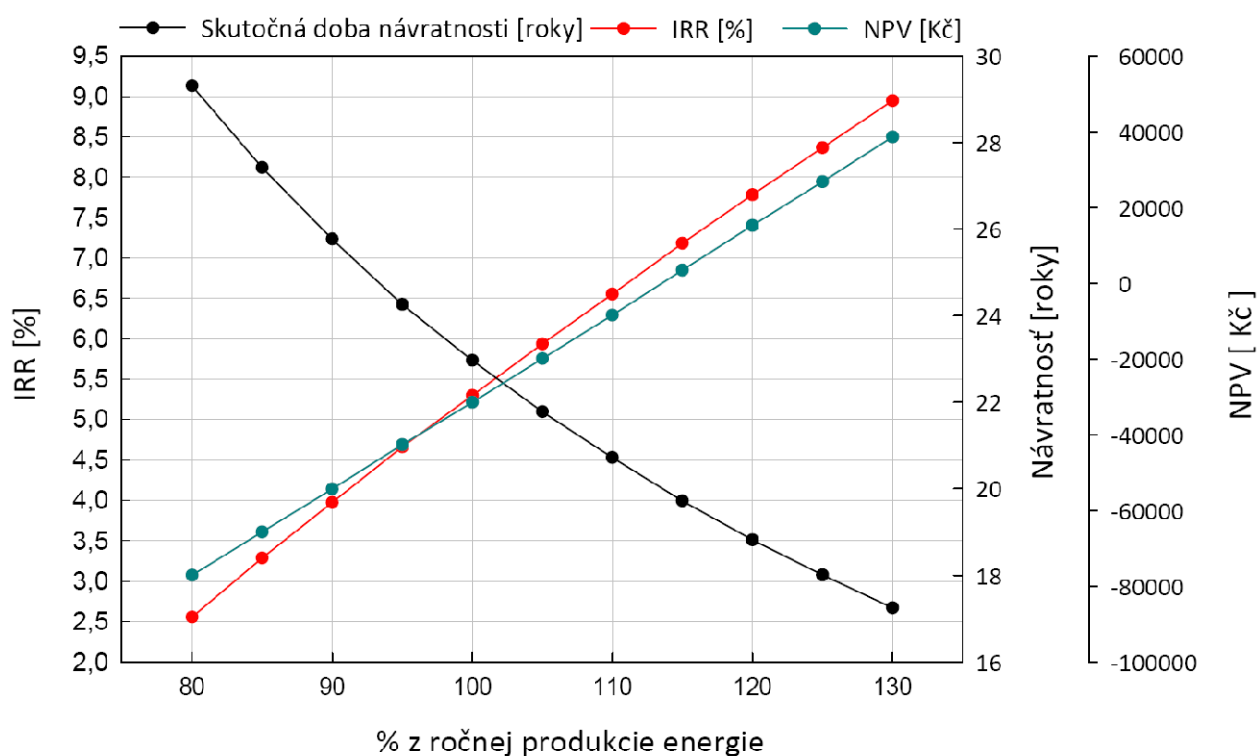
10.2 Citlivostná analýza na riziko zmeny produkcie energie

Tab. 10-11 Vplyv produkcie energie na NPV, IRR a návratnosť pre hybridný systém^b

Ročná produkcia energie ^a		NPV	IRR	Návratnosť
[%]	[kWh/rok]	[Kč]	[%]	[roky]
80%	2734,39	-77105,28	2,566	29,31
85%	2905,29	-65717,51	3,286	27,42
90%	3076,19	-54377,59	3,971	25,77
95%	3247,09	-42654,91	4,659	24,26
100%	3417,99	-31470,51	5,298	22,97
105%	3588,89	-19897,19	5,937	21,78
110%	3759,79	-8458,79	6,553	20,72
115%	3930,69	3455,77	7,18	19,71
120%	4101,59	15216,35	7,783	18,82
125%	4272,49	26786,12	8,364	18,01
130%	4443,39	38623,88	8,947	17,25

^a Jedná sa o vyprodukovanú energiu za 20r vztiahnutú na jeden rok s uvažovaním degradácie panelov

^b Hodnoty sú počítané pri uvažovaní spresňujúcich parametrov z tab. 10 – 9.



Obr. 10-1 Graf vplyvu produkcie energie na NPV, IRR a návratnosť investície

Ako vidíme na obr. 10-1 v prípade, že by vzrástla ročná produkcia elektrickej energie o 15%, hodnota IRR by presiahla hranicu 7 % , čistá súčasná hodnota by dosiahla kladných hodnôt, a teda projekt by bol ziskový s návratnosťou investície 19,72 roku.

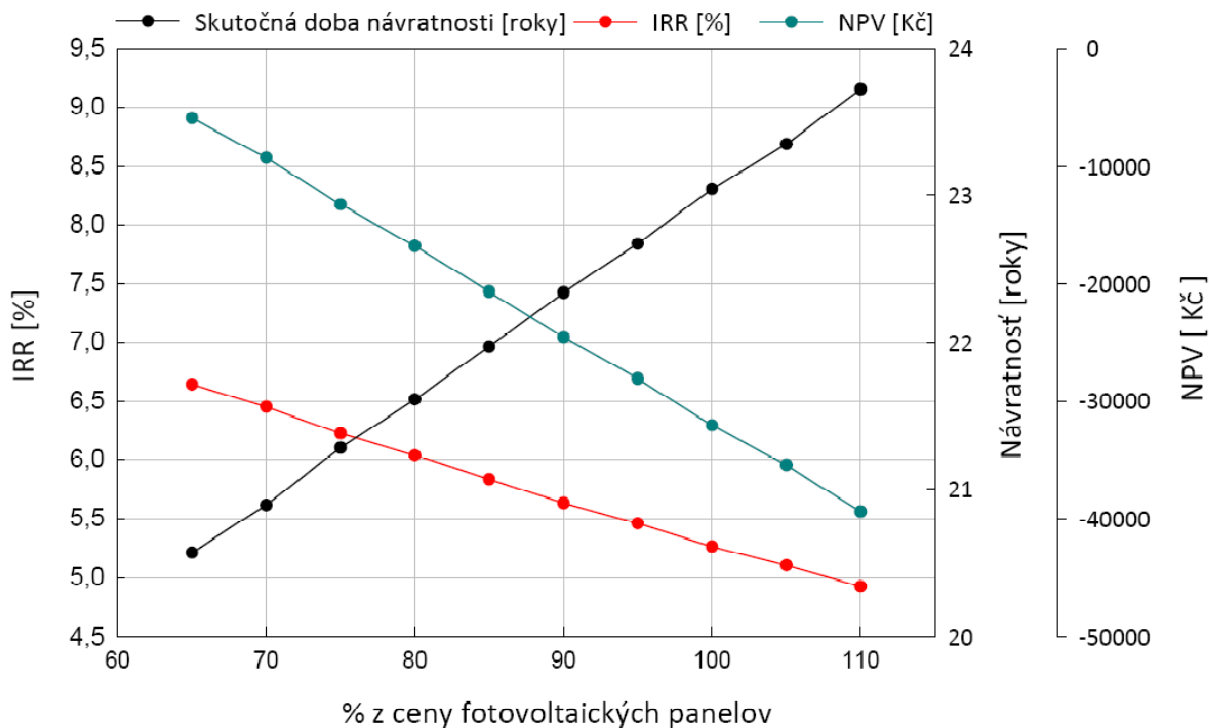
10.3 Citlivostná analýza na riziko zmeny ceny FV panelov

Tab. 10-12 Vplyv zmeny ceny panelov na NPV, IRR a návratnosť pre hybridný systém^b

Cena fotovoltaických panelov		NPV	IRR	Návratnosť
[%]	[Kč]	[Kč]	[%]	[roky]
65	55389,75	-5722,58	6,555	20,55
70	59650,50	-9058,44	6,463	20,87
75	63911,25	-13085,31	6,237	21,25
80	68172,00	-16469,05	6,055	21,57
85	72432,75	-20196,91	5,858	21,92
90	76693,50	-24216,36	5,651	22,31
95	80954,25	-27638,79	5,484	22,62
100	85215,00	-31470,50	5,598	22,97
105	89475,75	-34909,21	5,138	23,29
110	93736,50	-38706,20	4,963	23,64

^a Jedná sa o vyprodukovanú energiu za 20r vztiahnutú na jeden rok s uvažovaním degradácie panelov

^b Hodnoty sú počítané pri uvažovaní spresňujúcich parametrov z tab. 10 – 9.



Obr. 10-2 Graf vplyvu zmeny ceny panelov na NPV, IRR a návratnosť investície

Citlivostná analýza na zmenu ceny fotovoltaických panelov ukazuje, že pri 5% poklese z ceny dochádza k takmer štvormesačnému zníženiu návratnosti investície. Pri úvahe, že čínske panely pre takto malú inštaláciu sme schopní získať o 15–20 % lacnejšie, dochádzame k záveru, že 15 % úsporou na paneloch znižujeme návratnosť systému o rok.

10.4 Citlivostná analýza na riziko zmeny ceny silovej energie

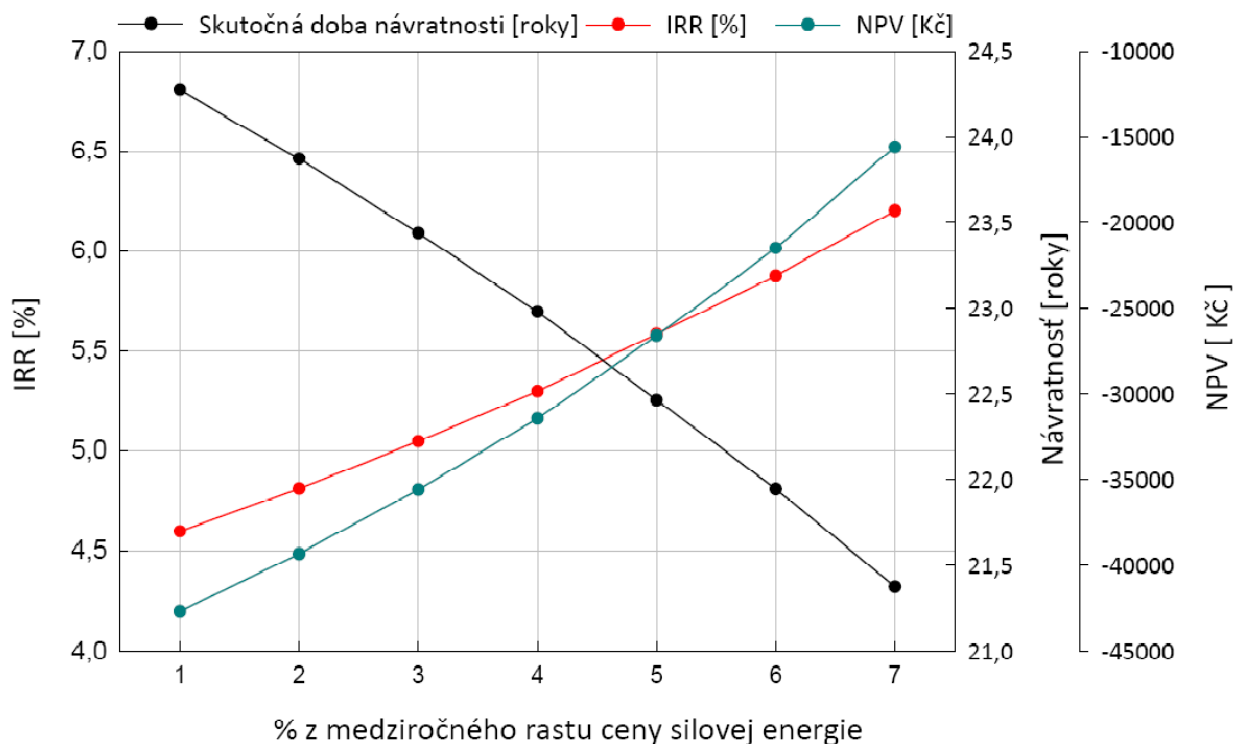
Tab. 10-13 Vplyv zmeny ceny^a silovej energie na NPV, IRR a návratnosť pre hybridný systém^c

Medziročný nárast ceny		NPV	IRR	Návratnosť
[%]	[Kč/kWh ^b]	[Kč]	[%]	[roky]
1%	2,91	-42723,13	4,595	24,272
2%	3,21	-39367,26	4,81	23,871
3%	3,56	-35607,45	5,045	23,438
4%	3,94	-31470,5	5,298	22,979
5%	4,38	-26621,81	5,584	22,463
6%	4,87	-21498,93	5,877	21,943
7%	5,43	-15588,19	6,202	21,372

^a Jedná sa o medziročný nárast ceny

^b Jedná sa o sumu cien elektrickej energie pri danom medziročnom raste za 20 rokov vztiahnutú na jeden rok

^c Hodnoty sú počítané pri uvažovaní spresňujúcich parametrov z tab. 10 – 9.



Obr. 10-3 Graf vplyvu zmeny ceny silovej energie na NPV, IRR a návratnosť investície

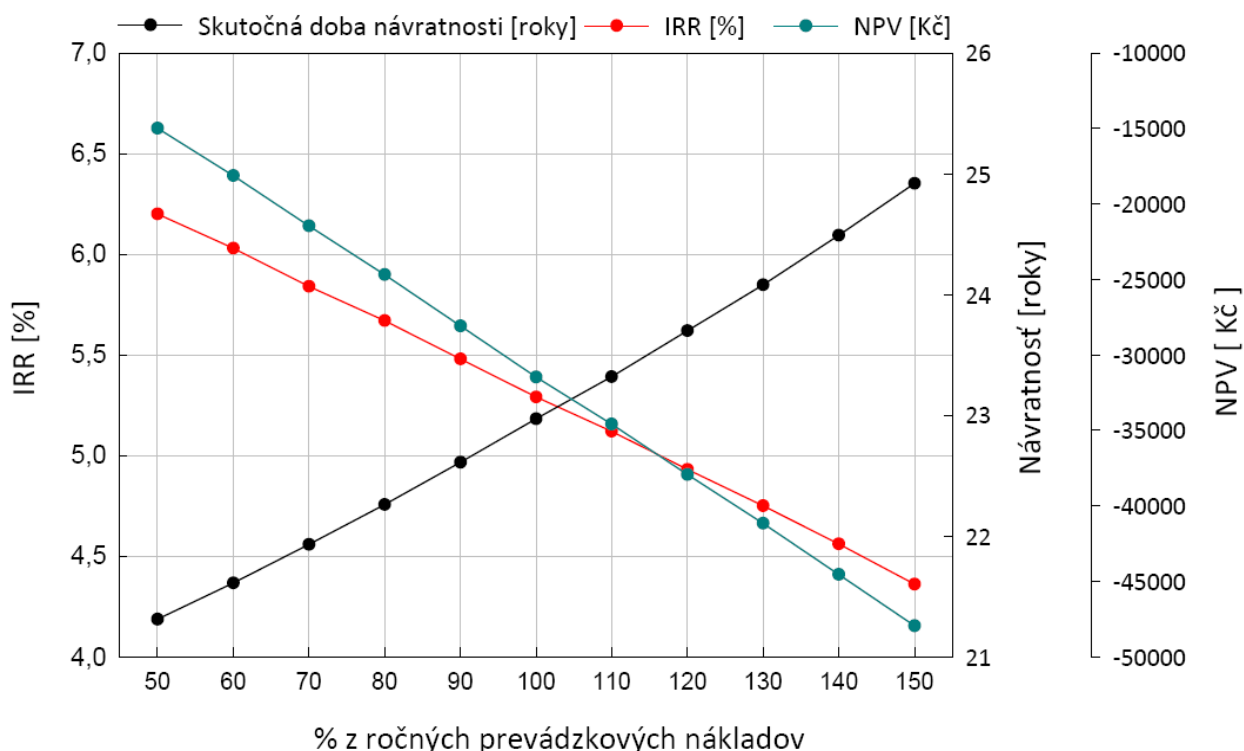
Citlivostná analýza pre skúmanie zmeny medziročného nárastu silovej energie ukazuje, že v prípade medziročného nárastu o jedno percento, napríklad z hodnoty 4 % na 5 %, dochádza k zníženiu doby návratnosti o približne pol roka. Aby bola hodnota vnútorného výnosového percenta vyššia ako diskontná sadzba, teda projekt by bol výnosný, musel by medziročný rast ceny prevýšiť hodnotu 9,5 %.

10.5 Citlivostná analýza na riziko zmeny prevádzkových nákladov

Tab. 10-14 Vplyv zmeny ceny ročných prevádzkových nákladov na NPV, IRR a návratnosť pre hybridný systém ^a

Cena prevádzkových nákladov		NPV	IRR	Návratnosť
%	Kč	Kč	%	roky
50	2002,40	-14989,85	6,2	21,31
60	2402,88	-18117,96	6,03	21,61
70	2803,36	-21452,25	5,84	21,93
80	3203,84	-24684,18	5,67	22,26
90	3604,32	-28077,61	5,48	22,61
100	4004,80	-31470,50	5,29	22,97
110	4405,28	-34598,61	5,12	23,32
120	4805,76	-37932,90	4,93	23,70
130	5206,24	-41164,87	4,75	24,08
140	5606,72	-44558,26	4,56	24,49
150	6007,20	-47951,15	4,36	24,92

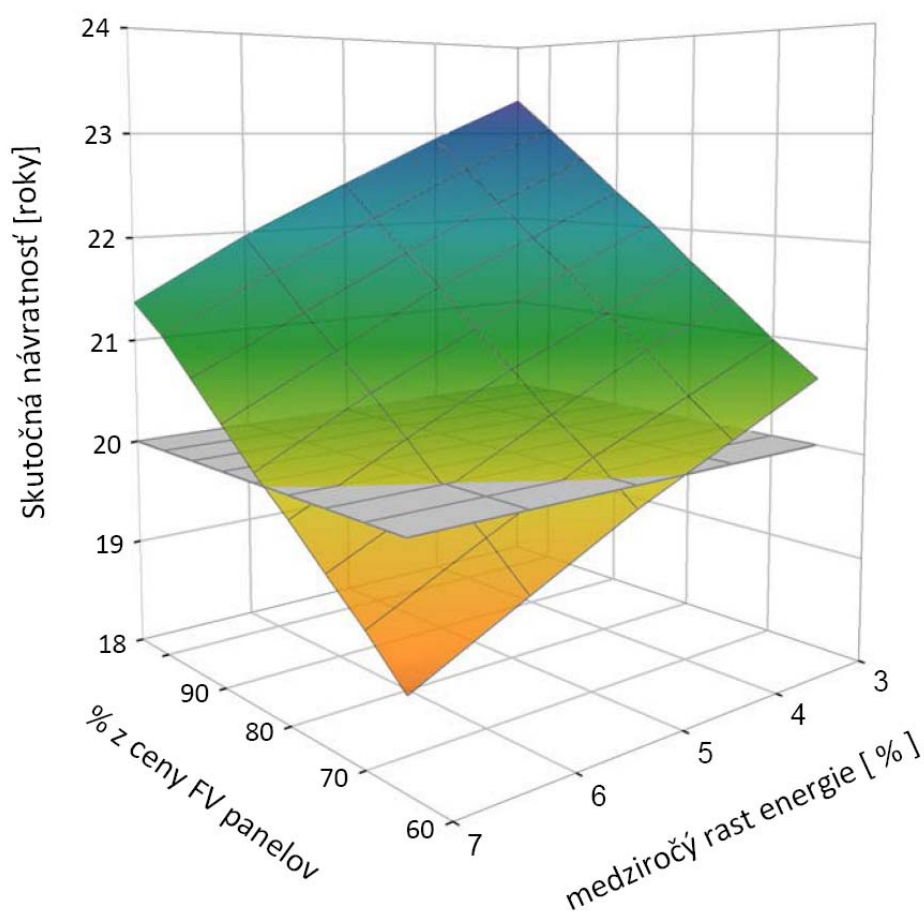
^a Hodnoty sú počítané pri uvažovaní spresňujúcich parametrov z tab. 10 – 9.



Obr. 10-4 Graf vplyvu zmeny prevádzkových nákladov na NPV, IRR a návratnosť investície

Posledným skúmaným aspektom pri spracovávaní citlivostnej analýzy je vplyv zmeny prevádzkových nákladov. Z obr. 10 – 4, resp. tabuľky 10 – 14, je zjavné, že 10 % zmena prevádzkových nákladov spôsobí približne štvormesačnú zmenu doby návratnosti. Hodnota vnútorného výnosového percenta nepresiahne 7 % ani v prípade, že náklady poklesnú o 50 % z uvažovanej ceny.

Keďže v praxi sa jednotlivé skúmané veličiny dynamicky menia, je vhodné kvantifikovať mieru vzájomného ovplyvňovania a týmto krokom získať presnejší výstup. Z predchádzajúcich výpočtov je zjavné, že skúmaný projekt je najviac citlivý na vplyv zmeny produkcie energie. Prijmeme však predpoklad, že navrhovaný fotovoltaický systém nevyrobí ročne viac energie ako hodnota, ktorú sme nasimulovali, z toho dôvodu sa zameriame na skúmanie miery vplyvu ceny fotovoltaických panelov a medziročného rastu ceny silovej energie. Keďže za posledný rok sa ceny fotovoltaických panelov prepadli v priemere o takmer 20 % môžeme predpokladať, že podobný trend bude pokračovať. V základnom predpoklade uvažujeme s medziročným rastom 4 %. Je veľmi pravdepodobné, že táto hodnota bude vyššia, a preto je vhodné skúmať vplyv, resp. mieru závislosti pre tieto dva majoritné faktory



Obr. 10-5 Graf skutočnej návratnosti investície ako funkcia ceny panelov a medziročného rastu elektrickej energie

Ako je možné z obr. 10-5 vidieť, hybridný fotovoltaický systém bude výnosný v intervale, ak bude skutočná návratnosť nižšia ako dvadsať rokov. Toto nastáva v prípade medziročného rastu elektrickej energie v intervale 5 – 7 %, a súčasne hodnota ceny uvažovaných fotovoltaických panelov musí klesnúť o 20 – 40 % z pôvodnej ceny. Teda napríklad v prípade 6 % medziročného rastu silovej energie a súčasne nákupu fotovoltaických panelov o 30 % lacnejšie, bude skutočná návratnosť 19,65 roku. Tento predpoklad platí, ak budeme uvažovať 90 % z pôvodných prevádzkových nákladov.

11 ZÁVER

Práca sa snaží skúmať súčasné trendy v oblasti akumulčných technológií a ich integrácie do FV systémov. Rozoberá základné princípy, akými sa v jednotlivých systémoch ukladá energia. Keďže každá technológia má svoje klady aj zápory, je dôležité zadefinovať základné kritéria, podľa ktorých budeme posudzovať výhodnosť, prípadne nevýhodnosť skúmaných technológií pre dané aplikácie. Pre komerčné nasadenie je najdôležitejšie cenové kritérium, resp. priemerná cena na kWh a dostupnosť technológie. V tesnom závese je životnosť. Otázka životnosti je v tomto prípade úzko spätá s hĺbkou vybijania v každom cykle, charakterom prevádzky a pracovnou teplotou, je veľmi náročné určiť presnú životnosť. Môžeme ju len odhadnúť na základe informácií dodávaných výrobcom.

Okrem akumulčných batérií sa práca zameriava aj na energetickú akumuláciu do vodíkového a elektrolytického média. Tieto systémy síce majú potenciál a sú komerčne prevádzkované, ale ich relatívne vysoká cenová hladina a malá účinnosť v prípade vodíkovej alternatívy zabraňujú ich plošnému nasadeniu v menších aplikáciách. Ako najlepšia možnosť pre chemické uskladnenie energie pre malé a stredné hybridné systémy sa ukazuje využitie gélových VRLA batérií. Bezúdržbový chod počas celej doby prevádzky, dobrý pomer medzi cenou a životnosťou sú aspekty, ktoré sú pre aplikácie tohto typu kľúčové. Pri veľkých systémoch, rádovo jednotky megawattov, môžeme uvažovať aj o technológii VRB, kde zvýšené vstupné náklady vyvažuje vysoká životnosť, čo je z dlhodobého hľadiska ekonomicky výhodnejšie.

Praktický návrh hybridného systému vychádza z teoretickej časti, v ktorej boli zadefinované základné technologické požiadavky. Pre účely samotného návrhu bol uvažovaný typový rodinný dom spadajúci z hľadiska energetickej náročnosti do kategórie A, teda veľmi úsporný. Vstupné hodnoty pre uvažovaný objekt vychádzajú z preukazu energetickej náročnosti, ktorý bol spracovaný certifikovanou firmou. Sklon fotovoltaiických panelov, ako aj ich orientácia, sú definované charakterom strechy. Pre priblíženie dostupného energetického zisku a optimálneho natočenia panelov pre lokalitu Praha – Ďáblice, v ktorej je riešený objekt situovaný, bola za pomoci fotovoltaiického informačného systému PVGIS v podkapitole 2.3 spracovaná analýza. Tá skúma závislosť optimálneho sklonu a azimutu pre dané ročné obdobie, resp. mesiac v roku. Výsledky potvrdzujú, že uvažovaná orientácia a sklon sú takmer ideálne. Podkapitola 9.3 pojednáva o návrhu potencionálneho inštalovaného výkonu. Ten je limitovaný situovaním strešných okien a komína na južnej strane strechy. Do úvahy však musíme brať aj typové rady hybridných striedačov, ako aj požiadavky prevádzkovateľa distribučnej siete. Po zvážení všetkých obmedzujúcich faktorov sa výkon 3,5 kWp javí ako optimálny. Samotná simulácia energetických tokov pre hybridný a zrovnávaný on-grid systém bola realizovaná za pomoci programu PVsyst. Vzhľadom na to, že používaný program bol v demo verzii, bol simulovaný chod FV systémov len pre jeden rok, s údajmi o ožiarení pre lokalitu Praha okolie z roku 1990. Výpočet kapacity akumulčných batérií vychádza zo simulácie, pri ktorej bola skúmaná veľkosť nevyužitej energie, teda energie dodávanej do siete. Navrhovaná kapacita 9,6 kWh na napäťovej úrovni 48 voltov sa ukazuje ako optimálna pre energetickú náročnosť riešeného objektu. Neoddeliteľnou súčasťou samotného návrhu je aj ekonomická stránka, ktorej sa v práci venuje kapitola desať. Ako vstupy pre výpočet návratnosti a jej sprievodných hodnotiacich ukazateľov boli použité závery z kapitoly deväť, resp. ročné energetické toky pre jednotlivé systémy. Pre spresnenie výpočtu boli uvažované nasledujúce faktory. Ročný rast ceny silovej energie vo výške 4%, degradácia fotovoltaiických panelov v 0,6 % miere a 2 % valorizácia výkupnej ceny. Pre hlbšie pochopenie závislosti jednotlivých faktorov, na konečnom zhodnotení

bola následne spracovaná citlivostná analýza na vybrané ukazatele. Vo výsledku zisťujeme, že hybridný systém má návratnosť prekračujúcu dvadsať rokov, čo je z ekonomického hľadiska brané ako nevýhodná investícia. Keďže odhadnúť skutočný vývoj zmeny vstupujúcich premenných výpočtu pre dobu dvadsať rokov je veľmi náročné, tento záver je nutné brať len orientačne. Ako je patrné z grafov týkajúcich sa citlivostnej analýzy, pri nepatrnej zmene jedného, resp. viacerých faktorov sa môžeme dostať pod hodnotu návratnosti dvadsať rokov.

Na druhej strane navrhnutý hybridný poskytuje oproti on-grid variante energetickú nezávislosť po dobu takmer štyroch mesiacov v roku. Toto je nezanedbateľným faktom, ktorý často rozhoduje. Ukazuje sa, že momentálne sa hybridné fotovoltaiické inštalácie nachádzajú v bode, kedy ešte stále nie sú výhodné z ekonomického pohľadu, avšak z ekologického a časom aj ekonomického hľadiska je to cesta, ktorou sa budú malé fotovoltaiické inštalácie uberať.

POUŽITÁ LITERATÚRA

- [1] lighthousesolar.com [online]. [2012] [cit. 2012-05-18]. Dostupné z:
< <http://www.lighthousesolar.com/content/img/album/grid-tied-battery-backup-solar-electric-system-design-detail.jpg> >
- [2] wolfsolar.webnode.cz [online]. [2012] [cit. 2012-05-18]. Dostupné z:
< <http://files.wolfsolar.webnode.cz/200000019-afe42b0dde/1.jpg> >
- [3] QUASCHNING, Volker. *Obnovitelné zdroje energií*. Praha : GRADA Publishing, 2008, 296 s, ISBN 978-80- 247-3250
- [4] LÁNÍK, L. *I-U charakteristiky fotovoltaických modulů spojovaných paralelně a do série*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 79 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Křivík, Ph.D.
- [5] saftbatteries.com [online]. [2012] [cit. 2012-05-18] Dostupné z:
<http://www.saftbatteries.com/doc/Documents/stationary/Cube782/com_sun+_en_0509.7e17f4ef-4201-408d-9d04-352699cae531.pdf>
- [6] saftbatteries.com [online]. [2012] [cit. 2012-05-18] Dostupné z:
< <http://www.saftbatteries.com/images/Produits/Photos/NHE.jpg> >
- [7] solarsud.com [online]. [2012] [cit. 2012-05-18] Dostupné z:
< <http://www.solarsud.com/images/OPzS%20Solar.jpg> >
- [8] regalelectro.com [online]. [2012] [cit. 2012-05-18] Dostupné z:
< <http://www.regalelectro.com.au/images/SEC/SEC4.png> >
- [9] tfy.tkk.fi [online]. [2012] [cit. 2012-05-18] Dostupné z:
< http://tfy.tkk.fi/aes/AES/projects/renew/fuelcell/images/fc_6.jpg >
- [10] obharle.com [online]. [2012] [cit. 2012-05-18] Dostupné z:
< http://www.bobharle.com/battery_img.jpg >
- [11] BÍLÍK, P., HRUDKA, G. *Měření harmonických do 9 kHz analyzátozem BK-ELCOM*. Časopis Elektro 10/2008. ISSN 1210-0889
- [12] KING, D.L.; KRATOCHVIL, J.A.; BOYSON, W.E.; , "Temperature coefficients for PV modules and arrays: measurement methods, difficulties, and results," *Photovoltaic Specialists Conference, 1997., Conference Record of the Twenty-Sixth IEEE* , vol., no., pp.1183-1186, 29 Sep-3 Oct 1997
- [13] KOUTRULIS, E.; KALAIZAKIS, K.; , "Novel battery charging regulation system for photovoltaic applications," *Electric Power Applications, IEE Proceedings* vol.151, no.2, pp. 191- 197, Mar 2004
- [14] WALKER, G.R.; SERNIA, P.C.; , "Cascaded DC-DC converter connection of photovoltaic modules," *Power Electronics, IEEE Transactions on* , vol.19, no.4, pp. 1130-1139, July 2004
- [15] DUNLOP, J.P., *Batteries and chargecontrol in stand-alone photovoltaic systems fundamentals and application*, Cocoa, SandiaNationalLaboratories, 1997.

- [16] morningstarcorp.com [online]. [2012] [cit. 2012-05-18] Dostupné z:
< http://www.morningstarcorp.com/uploads/resources/catalog%20images/TSMPPPTMeter_Sm.jpg >
- [17] solarni-panely.cz [online]. [2012] [cit. 2012-05-18] Dostupné z
< <http://solarni-panely.cz/layout/set/image/e-shop/hybridni-menice-napeti/hybridni-menice-napeti-studer-innotec-xtm-4000-48-4000w-48v> >
- [18] fg-forte.cz [online]. [2012] [cit. 2012-05-18] Dostupný z WWW
< <http://www.fg-forte.cz/images/detail/FG12-42DG.jpg>>
- [19] sunways.eu [online]. [2012] [cit. 2012-05-18] Dostupné z
< http://www.sunways.eu/static/sites/default/_images/products/it_SM_245U_110630-4.jpg >
- [20] ONDROUŠEK, L. *Připojování fotovoltaických zdrojů k distribuční síti*. Diplomová práce. Brno: Ústav elektroenergetiky FEKT VUT v Brně, 2009, 99 stran.
- [21] *Cenové rozhodnutí Energetického regulačního úřadu*. [on-line]. [cit. 2012-05-18] Dostupné z: < http://www.eru.cz/dias-browse_articles.php?parentId=38&deep=off&type >
- [22] RYDH,C,J, BJORN A. *Energy analysis of batteries in photovoltaic systems. Part I: Performance and energy requirements, Energy Conversion and Management*, Volume 46, Issues 11-12, July 2005, Pages 1957-1979, ISSN 0196-8904
- [23] BAČA, P. *Akumulace energie z OZE - vodíkové hospodářství*, TZB-info, 2011, roč. 2011, č.2, s. 1-10, ISSN: 1801-4399
- [24] BAROTE, L.; WEISSBACH, R.; TEODORICUS, R.; MARINESCU, C.; CIRSTEA, M.; , *"Stand-alone wind system with Vanadium Redox Battery energy storage," Optimization of Electrical and Electronic Equipment*, 2008. OPTIM 2008. 11th International Conference on , vol., no., pp.407-412, 22-24 May 2008
- [25] KJAER, S.B.; PEDERSEN, J.K.; BLAABJERG, F.; , *"A review of single-phase grid-connected inverters for photovoltaic modules,"* Industry Applications, IEEE Transactions on , vol.41, no.5, pp. 1292- 1306, Sept.-Oct. 2005
- [26] KŘIVÍK, P. ; BAČA, P. *Současné možnosti akumulace elektrické energie ve fotovoltaických aplikacích. In 28. NEKONVENČNÍ ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE. Rožnov pod Radhoštěm: SŠIEŘ Rožnov pod Radhoštěm, 2007.s. 39-44. ISBN: 978-80-02-01961-9*

PRÍLOHA A JEDNOPÓLOVÉ SCHÉMA HYBRIDNEJ FVE

