



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

KOMPLEXNÍ PROVOZNÍ DIAGNOSTIKA FVE-T14 - OPATŘENÍ PRO OPTIMALIZACI PROVOZU

OPERATIONAL DIAGNOSTICS OF PV PLANT -T14 - OPERATION
OPTIMIZING

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Roman Kroutil

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Mastný, Ph.D.

BRNO 2016



Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektroenergetika**
Ústav elektroenergetiky

Student: Bc. Roman Kroutil

ID: 146874

Ročník: 2

Akademický rok: 2015/16

NÁZEV TÉMATU:

Komplexní provozní diagnostika FVE-T14 - opatření pro optimalizaci provozu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Zpracujte na základě legislativních předpisů postupy pro kontrolu provozních parametrů a diagnostiku FV systémů.
2. V souladu s legislativou provedte diagnostiku FVe a navrhnete optimalizaci postupů.
3. Na základě provedených měření navrhnete optimalizaci jednotlivých částí diagnostikovaného systému.
4. U navržených opatření provedte energeticko-ekonomickou analýzu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 8.2.2016

Termín odevzdání: 20.5.2016

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

Konzultant 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.

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Petru Mastnému, Ph.D. za trpělivost, připomínky a užitečné rady, které mi poskytoval při zpracování práce. Dále chci poděkovat Ing. Janu Morávkovy za ochotu, konzultace a cenné rady týkající se měření FVE a v neposlední řadě děkuji své rodině za podporu v průběhu studia.

Bibliografická citace práce:

KROUTIL, R. *Komplexní provozní diagnostika FVE-T14 - opatření pro optimalizaci provozu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 93 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.

.....

ABSTRAKT

Cílem diplomové práce je teoretické objasnění problematiky fotovoltaických elektráren, jejich diagnostiky, kontroly a měření výkonnosti, vč. možných negativních vlivů na jejich provoz a následná aplikace teoretických znalostí při praktické kontrole a diagnostice FVE.

Na úvod se práce věnuje konstrukci, výrobě a vývoji FV článků a panelů, dále popisuje ostatní nezbytné prvky a komponenty, vč. jejich použití v jednotlivých typech fotovoltaických systémů.

V další části jsou popsány elektrické parametry FV článků a panelů, zejména parametry, které lze zjistit měřením V-A charakteristik a také parametry, které ovlivňují tvar V-A charakteristik.

Ve třetí části jsou uvedeny poruchy fotovoltaických systémů, mezi které patří nejruznější defekty fotovoltaických článků a panelů, dále jsou zde uvedeny negativní faktory ovlivňující chod celého systému, jež souvisí nejen s klimatickými vlivy, ale také se samotným návrhem fotovoltaického systému.

Čtvrtá část se zabývá možnostmi zvýšení efektivnosti výroby elektrické energie z FVE na základě praktických zkušeností jejich provozovatelů.

V následující části jsou na základě technických norem stanoveny postupy pro kontrolu FVE, postupy pro měření a diagnostiku FVE a také další náležitosti, které s kontrolou a měřením souvisí. Jsou zde také popsány požadavky na měřicí přístroje, nejčastější chyby měření, negativní faktory ovlivňující měření a způsoby vyhodnocení naměřených dat.

Poslední část práce je praktická. Nejprve se zabývá ověřením vlivu defektů FV modulů na tvar jejich V-A charakteristik, následně provedením kontroly a diagnostiky konkrétní FVE elektrárny, vyhodnocením zjištěných údajů a naměřených dat a návrhem optimalizačních opatření pro zvýšení efektivnosti provozu dané FVE.

KLÍČOVÁ SLOVA: FV elektrárna; FV panel; provoz FVE; diagnostika FVE; kontrola FVE; defekty fotovoltaických panelů; poruchy fotovoltaických systémů

ABSTRACT

The aim of the Thesis is theoretical clarification of the issues of photovoltaic power plants, their diagnostics, inspection and performance measurement, including negative impacts on their operation and subsequent application of theoretical knowledge during practical inspection and diagnostics of PV power plants.

In its introductory part, the Thesis deals with design, manufacturing and development of PV cells and panels and describes other necessary elements and components, including their use in individual types of photovoltaic systems.

Another part describes electric parameters of PV cells and panels, especially the parameters that can be found out by measurement of V-A characteristics and also the parameters affecting the shape of the V-A characteristics.

The third part is focused on failures of photovoltaic systems, which include various defects of photovoltaic cells and panels, it also provides for adverse factors affecting operation of the entire system, associated not only with weather influences but also with the actual design of the photovoltaic system.

The fourth part deals with possibilities of increasing the cost-effectiveness of electricity generation by PV power plants on the basis of practical experience of their operators.

The subsequent part determines, on the basis of technical standards, procedures for PV power plant inspections, the procedures for measurement and diagnostics of PV power plants and also other prerequisites connected with inspections and measurements. This part includes also a description of requirements for measuring devices, most frequent measurement errors, adverse impacts affecting measurements and methods of assessment of the data measured.

The last part of the Thesis is practical. At first it deals with verification of the impact of defects of PV modules on the shape of their V-A characteristics, then with execution of inspections and diagnostics of a particular PV power plant, evaluation of the data identified and measured, as well as with a proposal of optimisation measures to increase cost-efficiency of the operation of that particular PV power plant.

KEY WORDS:

PV power plant; PV panel; PV power plant operation; PV power plant diagnostics; PV power plant inspection; photovoltaic panel defects; photovoltaic system failures

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	9
SEZNAM TABULEK	11
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	12
ÚVOD.....	13
1 SEZNÁMENÍ S PROBLEMATIKOU FOTOVOLTAICKÝCH SYSTÉMŮ	14
1.1 FOTOVOLTAICKÝ ČLÁNEK OBECNĚ.....	14
1.2 KONSTRUKCE, VÝROBA A VÝVOJ FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ A PANELŮ.....	15
1.2.1 VÝROBA KŘEMÍKU	15
1.2.2 FOTOVOLTAICKÉ ČLÁNKY	15
1.2.3 FOTOVOLTAICKÉ PANELY	16
1.3 TYPY FOTOVOLTAICKÝCH SYSTÉMŮ.....	17
1.3.1 AUTONOMNÍ SYSTÉMY (GRID-OFF).....	17
1.3.2 SYSTÉMY PŘIPOJENÉ NA SÍŤ (ON-GRID)	17
1.4 PRVKY FOTOVOLTAICKÉHO SYSTÉMU	18
1.4.1 MĚNIČE NAPĚTÍ.....	18
1.4.2 AKUMULÁTOROVÁ BATERIE.....	19
1.4.3 SOLÁRNÍ REGULÁTOR	20
1.4.4 NOSNÉ KONSTRUKCE	20
1.4.5 OCHRANA PŘED BLESKEM	21
1.4.6 ELEKTRICKÁ VEDENÍ	21
1.4.7 OSTATNÍ PRVKY FV SYSTÉMU	22
1.5 ELEKTRICKÉ PARAMETRY FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ	23
1.5.1 MATEMATICKÝ MODEL FV ČLÁNKU	23
1.5.2 VOLTAMPÉROVÁ CHARAKTERISTIKA FV ČLÁNKU	23
1.5.3 PROUD NAKRÁTKO I_{sc} (SHORT CIRCUIT)	24
1.5.4 NAPĚTÍ NAPRÁZDNO U_{oc} (OPEN CIRCUIT).....	24
1.5.5 PRACOVNÍ BOD PB	24
1.5.6 MAXIMÁLNÍ VÝKON MPP (MAXIMAL POWER POINT).....	25
1.5.7 EFEKTIVITA VÝROBY ELEKTRICKÉ ENERGIE FF (FILL FACTOR)	25
1.5.8 ÚČINNOST FV ČLÁNKU EEF	25
1.5.9 SÉRIOVÝ R_s A PARALELNÍ R_p ODPOR ČLÁNKU.....	26
1.5.10 NEELEKTRICKÉ PARAMETRY	27
1.5.11 PROVOZNÍ VÝKONNOST FVE.....	28
2 PORUCHY FOTOVOLTAICKÝCH SYSTÉMŮ.....	29
2.1 DEFEKTY FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ.....	29
2.1.1 MATERIÁLOVÉ DEFEKTY (GROW DEFECTS)	29
2.1.2 PROCESNÍ DEFEKTY (PROCESSING INDUCED DEFECTS)	30
2.2 DEFEKTY FOTOVOLTAICKÝCH PANELŮ	30
2.2.1 POTENCIÁLNÍ INDUKOVANÁ DEGRADACE (PID)	30
2.2.2 DEGRADACE FV PANELŮ DOPADAJÍCÍM ZÁŘENÍM (LID)	31
2.2.3 DELAMINACE FV PANELU	32

2.2.4 PRORAŽENÍ/VYHOŘENÍ BYPASSOVÉ DIODY	32
2.2.5 HORKÁ MÍSTA (HOT SPOTS)	33
2.2.6 ŠNEČÍ CESTIČKY (SNAIL TRAILS)	34
2.3 NEGATIVNÍ FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ CHOD FV SYSTÉMU	35
2.3.1 ZASTÍNĚNÍ.....	35
2.3.2 VÍTR	35
2.3.3 SNÍH	36
2.3.4 PORUCHY KABELÁŽE	36
2.3.5 NEVHODNÉ JIŠTĚNÍ A SPÍNACÍ PRVKY.....	37
2.3.6 PŘECHODOVÝ ODPOR.....	38
2.3.7 PŘÍDAVNÉ ZTRÁTY NA AC A DC STRANĚ.....	38
2.3.8 NEVHODNÝ NÁVRH ROZVÁDĚČE	38
2.3.9 NEVHODNĚ ZVOLENÝ ČI DIMENZOVANÝ STRÍDAČ	38
2.3.10 NEVHODNÁ KOMBINACE PANELŮ A NESYMETRICKÉ STRINGY	39
2.3.11 NEVHODNÝ SKLON A ORIENTACE PANELŮ	39
3 EFEKTIVITA PROVOZU FVE- TEORIE VS. PRAXE	40
3.1 NÁVRH FVE.....	40
3.2 PROVOZ FVE.....	41
3.3 PRAKTICKÉ POZNATKY Z PROVOZU FVE	41
3.4 SHRNUTÍ POZNATKŮ	41
4 METODIKA KONTROLY A DIAGNOSTIKY FVE	42
4.1 KONTROLA FVE	43
4.1.1 POŽADAVKY NA SYSTÉMOVOU DOKUMENTACI.....	43
4.1.2 KONTROLA DC ČÁSTI SYSTÉMU	44
4.1.3 KONTROLA AC STRANY SYSTÉMU	45
4.1.4 KONTROLA OZNAČENÍ A IDENTIFIKACE.....	45
4.1.5 VIZUÁLNÍ KONTROLA	45
4.2 DIAGNOSTIKA A TESTOVÁNÍ FVE.....	46
4.2.1 KONTINUITA OCHRANNÉHO ZEMNĚNÍ ČI VYROVNÁNÍ POTENCIÁLU	46
4.2.2 TEST POLARITY	46
4.2.3 MĚŘENÍ AKTUÁLNÍHO NAPĚTÍ A PROUDU- PROVOZNÍ ZKOUŠKA	46
4.2.4 MĚŘENÍ NAPĚTÍ NAPRÁZDNO A PROUDU NAKRÁTKO FV ZAŘÍZENÍ	46
4.2.5 MĚŘENÍ IZOLAČNÍHO ODPORU FV ZAŘÍZENÍ	47
4.2.6 MĚŘENÍ AC STRANY	48
4.2.7 MĚŘENÍ V-A CHARAKTERISTIK	49
4.2.8 ÚČINNOST MPP TRACKERU (OVĚŘENÍ SPRÁVNÉHO NASTAVENÍ BODU MPP).....	50
4.2.9 OVĚŘENÍ ÚČINNOSTI MĚNIČE.....	51
4.2.10 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ PRŮBĚH MĚŘENÍ	52
4.2.11 TYPICKÉ PROBLÉMY A DEFEKTY FV GENERÁTORŮ A JEJICH VLIV NA TVAR V-A KŘÍVKY ..53	53
4.2.12 MĚŘENÍ TERMO-KAMEROU	57
4.2.13 ZPRÁVA O TESTOVÁNÍ	60
4.2.14 KOREKCE NAMĚŘENÝCH HODNOT	60
4.2.15 SPEKTRÁLNÍ KOREKCE NAMĚŘENÝCH HODNOT V-A CHARAKTERISTIK	61
4.3 MĚŘÍCÍ ZAŘÍZENÍ A VYBAVENÍ PRO DIAGNOSTIKU FVE	62
4.3.1 BEZPEČNOST	62
4.3.2 PROUDOVÝ A VÝKONOVÝ ROZSAH.....	62

4.3.3 PŘESNOST	62
4.4 ÚČEL KONTROLY A DIAGNOSTIKY FVE	65
4.4.1 KONTROLA A TESTOVÁNÍ PŘI UVÁDĚNÍ FVE DO PROVOZU	65
4.4.2 PRAVIDELNÁ KONTROLA A DIAGNOSTIKA FVE	65
4.4.3 KONTROLA A DIAGNOSTIKA FVE ZA ÚČELEM ZVÝŠENÍ VÝKONNOSTI ČI OPTIMALIZACE PARAMETRŮ	65
5 PRAKTICKÉ MĚŘENÍ A DIAGNOSTIKA.....	66
5.1 OVĚŘENÍ VLIVU DEFEKTŮ FV GENERÁTORŮ NA TVAR JEJICH V-A CHARAKTERISTIKY.....	66
5.1.1 VLIV ZNEČIŠTĚNÍ	66
5.1.2 VLIV ZASTÍNĚNÍ	67
5.1.3 VLIV POPRASKANÉHO KRYCÍHO SKLA	71
5.1.4 VLIV HORKÉHO MÍSTA NEBOLI HOT-SPOTU	72
5.2 KONTROLA A DIAGNOSTIKA FVE T14	73
5.2.1 PŘEDMĚT KONTROLY A TESTOVÁNÍ.....	73
5.2.2 POPIS OBJEKTU.....	73
5.2.3 BLOKOVÉ SCHÉMA FVE T14	73
5.2.4 PARAMETRY POUŽITÝCH FV MODULŮ	73
5.2.5 KONTROLA DOKUMENTACE, SKUTEČNÉHO PROVEDENÍ A VIZUÁLNÍ KONTROLA.....	74
5.2.6 MĚŘENÍ A DIAGNOSTIKA FV SYSTÉMU.....	75
5.2.7 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ A NÁVRH ŘEŠENÍ	86
ZÁVĚR.....	89
POUŽITÁ LITERATURA	90
SEZNAM PŘÍLOH.....	93

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1.1-1 Fotovoltaický jev [33]</i>	14
<i>Obr. 1.1-2 Princip činnosti FV článku [4]</i>	14
<i>Obr. 1.2-1 Ingot monokrystalického křemíku [4]</i>	15
<i>Obr. 1.2-2 Schéma jednoduchého a vysoce účinného křemíkového FV článku [1]</i>	16
<i>Obr. 1.2-3 Řez fotovoltaickým panelem [1]</i>	16
<i>Obr. 1.3-1 Ostrovní systém s akumulací elektrické energie</i>	17
<i>Obr. 1.3-2 On-grid systém s prodejem přebytků do sítě</i>	18
<i>Obr. 1.4-1 Centrální (A), řetězcové (B) a modulové střídače (C) [3]</i>	19
<i>Obr. 1.5-1 Náhradní schéma FV článku [27]</i>	23
<i>Obr. 1.5-2 V-A charakteristika FV článku</i>	24
<i>Obr. 1.5-3 Vliv sériového R_S a paralelního R_P odporu na tvar V-A charakteristiky [21]</i>	26
<i>Obr. 1.5-4 Vliv teploty na změnu průběhu V-A charakteristiky</i>	27
<i>Obr. 1.5-5 Vliv intenzity slunečního záření na změnu V-A charakteristiky</i>	28
<i>Obr. 2.1-1 Vírový defekt [14]</i>	29
<i>Obr. 2.2-1 Potenciální indukovaná degradace [20][22][19]</i>	31
<i>Obr. 2.2-2 Degradace FV panelů dopadajícím zářením [25]</i>	31
<i>Obr. 2.2-3 Delaminace FV panelu [11]</i>	32
<i>Obr. 2.2-4 Proražení bypassové diody a vliv aktivace na tvar V-A charakteristiky [19]</i>	33
<i>Obr. 2.2-5 Horká místa zachycená termokamerou [13]</i>	33
<i>Obr. 2.2-6 Snail trails nebo „šnečí cestičky“ [12]</i>	34
<i>Obr. 2.3-1 Vliv zastínění na výkon FV panelu [18]</i>	35
<i>Obr. 2.3-2 FV elektrárna poškozená účinky větru [18]</i>	35
<i>Obr. 2.3-3 Promáčknutý FV panel a ohnutý rám [18]</i>	36
<i>Obr. 2.3-4 Způsob jištění FVE se třemi a více stringy [11]</i>	37
<i>Obr. 2.3-5 Špatný kontakt způsobující nežádoucí ohřev [23]</i>	38
<i>Obr. 3.4-1 Obecné schéma FV systému s jedním FV polem [39]</i>	42
<i>Obr. 4.2-1 Měření, nominální a STC $U(I)$, $P(I)$ křivky</i>	50
<i>Obr. 4.2-2 Srovnání naměřených hodnot MPP</i>	51
<i>Obr. 4.2-3 Projev nesprávně určených modulových údajů či chybného měření</i>	53
<i>Obr. 4.2-4 Nesprávný počet modulů ve stringu</i>	54
<i>Obr. 4.2-5 Náhlá změna ozáření během měření</i>	54

<i>Obr. 4.2-6</i>	<i>Vybledlý (zestárlý) či rovnoměrně znečištěný FV modul.....</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 4.2-7</i>	<i>Vliv zastíněných FV modulů na V-A charakteristiku FV stringu.....</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 4.2-8</i>	<i>Částečně zastíněný FV modul.....</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 4.2-9</i>	<i>Vliv plně zastíněného by-pass sektoru FV modulu</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 4.2-10</i>	<i>Vliv dodatečného sériového odporu</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 4.2-11</i>	<i>Emisivita a odrazivost dle úhlu měření, doporučený úhel měření [38]</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 4.3-1</i>	<i>Příklad správného a chybného umístění snímače ozáření [35]</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 4.3-2</i>	<i>Příklad správného a chybného umístění teplotního čidla [35]</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 5.1-1</i>	<i>Vliv znečištění FV modulu na tvar V-A charakteristiky</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 5.1-2</i>	<i>V-A charakteristika čistého FV modulu SolarWatt 60P</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 5.1-3</i>	<i>Vliv přímkového zastínění na tvar V-A charakteristiky</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 5.1-4</i>	<i>Vliv úplného zastínění jednoho FV článku</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 5.1-5</i>	<i>Vliv úplného zastínění dvou FV článků</i>	<i>69</i>
<i>Obr. 5.1-6</i>	<i>Vliv úplného zastínění tří a čtyř FV článků</i>	<i>69</i>
<i>Obr. 5.1-7</i>	<i>Vliv částečného zastínění čtyř FV článků v jednom by-pass sektoru</i>	<i>70</i>
<i>Obr. 5.1-8</i>	<i>Vliv částečného zastínění čtyř FV článků ve dvou by-pass sektorech</i>	<i>70</i>
<i>Obr. 5.1-9</i>	<i>Vliv rovnoměrně popraskaného krycího skla na tvar V-A charakteristiky.....</i>	<i>71</i>
<i>Obr. 5.1-10</i>	<i>Vliv horkého místa na tvar V-A charakteristiky</i>	<i>72</i>
<i>Obr. 5.2-1</i>	<i>Blokové schéma FVE T14.....</i>	<i>73</i>
<i>Obr. 5.2-2</i>	<i>V-A charakteristika FV stringu č.1.....</i>	<i>76</i>
<i>Obr. 5.2-3</i>	<i>V-A charakteristika FV stringu č.2.....</i>	<i>76</i>
<i>Obr. 5.2-4</i>	<i>V-A charakteristika FV stringu č.3.....</i>	<i>77</i>
<i>Obr. 5.2-5</i>	<i>V-A charakteristika FV panelu č.15 ve stringu č.1.....</i>	<i>78</i>
<i>Obr. 5.2-6</i>	<i>V-A charakteristika FV modulu 2.6.....</i>	<i>79</i>
<i>Obr. 5.2-7</i>	<i>V-A charakteristika FV modulu 2.11</i>	<i>80</i>
<i>Obr. 5.2-8</i>	<i>Snímek přípojovacího boxu a konektorů FV modulu 2.8.....</i>	<i>81</i>
<i>Obr. 5.2-9</i>	<i>Termovizní pohled na část FV pole</i>	<i>81</i>
<i>Obr. 5.2-10</i>	<i>Termovizní snímek stringboxu R-DC.....</i>	<i>82</i>
<i>Obr. 5.2-11</i>	<i>Oteplení zastíněného článku.....</i>	<i>83</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 4.2-1 Velikost zkušebního napětí [39].....</i>	<i>48</i>
<i>Tab. 4.2-2 Příklad poruch a jejich projevů detekovatelných pomocí termo-kamery [38].....</i>	<i>59</i>
<i>Tab. 5.1-1 Základní parametry FV modulu SolarWatt 60P</i>	<i>66</i>
<i>Tab. 5.1-2 Základní parametry FV modulu Conergy PH 250P.....</i>	<i>71</i>
<i>Tab. 5.1-3 Základní parametry FV modulu Canadian Solar 235P.....</i>	<i>72</i>
<i>Tab. 5.2-1 Parametry FV modulu Fire Energy 240P.....</i>	<i>73</i>
<i>Tab. 5.2-2 Změřené hodnoty izolačního odporu FV stringů.....</i>	<i>75</i>
<i>Tab. 5.2-3 Elektrické parametry FV stringů odečtené z měřených V-A charakteristik.....</i>	<i>77</i>
<i>Tab. 5.2-4 Elektrické parametry FV modulů s LID odečtené z měřených V-A charakteristik.....</i>	<i>79</i>
<i>Tab. 5.2-5 Naměřené hodnoty FV modulu 2.4 přepočtené na STC.....</i>	<i>83</i>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

FV	Fotovoltaický
FVE	Fotovoltaická elektrárna
PN	Oblast na rozhraní polovodiče typu P a polovodiče typu N
DC	Střenosměrný proud
AC	Střídavý proud
EVA	Etylen vinyl acetát
V-A	Volt-Ampér
MPP	Bod maximálního výkonu
UV	Ultra fialové záření
D	Dioda
PB	Pracovní bod
STC	Standardní testovací podmínky
AM	Vzduchová hmota
NOCT	Nominální operační teplota
PID	Potenciální indukovaná degradace
LID	Degradace dopadajícím zářením
ČSN	Česká technická norma
PE	Svorka ochranné vodiče

Značka	Veličina	Jednotka
U	Elektrické napětí	V
I	Elektrický proud	A
P	Činný výkon	W
T	Teplota	K, °C
I_{rr}	Intenzita záření	W/m^2
η	Účinnost	%
E	Energie	eV, Wh
l	Délka	m
FF	Činitel plnění	-
R	Elektrický odpor	Ω
A	Obsah plochy	m^2
α	Proudový teplotní koeficient	A/K
β	Napěťový teplotní koeficient	V/K
PR	Provozní výkonnost	%

ÚVOD

Elektrická energie je v současné době jednou z nejvýznamnějších forem energie na zemi. Elektrická energie nevzniká samovolně a proto je zapotřebí ji vyrábět, výrobních procesů existuje mnoho, např. spalování fosilních paliv, využití jaderné reakce a dalších, a to vše za účelem získání dostatečného množství tepelné energie, která je pomocí vhodných měničů, převedena na energii elektrickou. Už ze samotné podstaty procesů jednotlivých výroben jsou patrné základní, ale velmi důležité aspekty. Elektrárny spalující fosilní paliva jsou závislé na zásobách těchto paliv na zemi, které nejsou neomezené a rok od roku se značně zmenšují. Dalším, ale zásadním a v současné době jednoznačně aktuálním problémem je ekologie a ochrana životního prostředí. U elektráren se spalovacím procesem je kromě těžby a zpracování paliv, největším negativem vysoká produkce oxidu uhličitého a dalších nežádoucích plynů, u jaderných elektráren zejména způsob zpracování vyhořelého paliva a také mnoho dalších negativních vlivů běžných elektráren na životní prostředí.

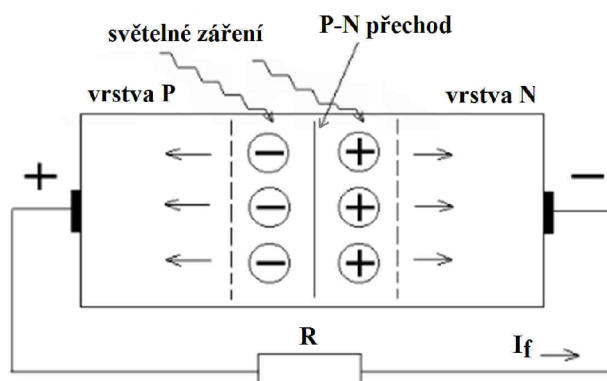
Vzhledem k výše uvedeným faktům je v současné době velmi diskutovaným tématem výroba elektrické energie z obnovitelných zdrojů, mezi něž patří právě fotovoltaické elektrárny. I přes to, že pořizovací náklady jsou zatím značně vysoké a účinnost přeměny samotných FV panelů je ve srovnání s běžnými elektrárnami velmi malá, zažívají fotovoltaické elektrárny v posledních letech velký rozmach. Výhodou je minimální vliv na životní prostředí, poměrně vysoká výtěžnost cca 85%, na první pohled nízké nároky na provozování a údržbu, možnost instalace prakticky kdekoli, kde jsou pro jejich výstavbu vhodné podmínky, a zejména ekonomická podpora výstavby a vývoje těchto systémů.

Hlavním požadavkem na fotovoltaické systémy je maximální možná efektivnost výroby elektrické energie, s čímž souvisí celý proces návrhu, instalace a provozu daného systému. Základem je kvalitní návrh celého systému, výběr a montáž jednotlivých prvků systému od čehož se odvíjí efektivnost a spolehlivost budoucího provozu. Další neméně důležitým úkonem je volba vhodného monitorovacího systému, který kromě informace o vyrobené energii umožňuje sledovat odchylky od předpokládaného chodu systému, kdy každá větší odchylka může znamenat velké ekonomické ztráty, a proto je kladen velký důraz na provádění kontrol systému, které by měli být prováděny v pravidelných intervalech, aby bylo možné odhalit případné defekty či poruchy včas, než způsobí velké ekonomické škody. Právě na provádění těchto kontrol, měření výkonnosti a odhalení případných defektů a poruch fotovoltaického systému se v této práci zaměříme.

1 SEZNÁMENÍ S PROBLEMATIKOU FOTOVOLTAICKÝCH SYSTÉMŮ

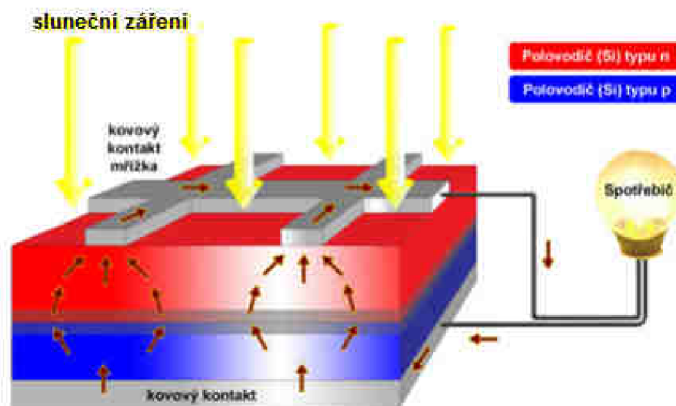
1.1 Fotovoltaický článek obecně

Jedná se vlastně o velkoplošnou diodu, která musí mít alespoň jeden PN přechod. Využívá fotovoltaického jevu pro přímou přeměnu slunečního záření na elektrickou energii. Dopadající fotony procházejí materiálem a interagují s jeho částicemi, nejpodstatnější je interakce s vázanými elektrony, při níž dochází k uvolnění elektronu a vzniku volného nosiče náboje, interakce s ostatními částicemi má za následek pouze vznik tepla. Fotovoltaický jev je ilustrován na *Obr. 1.1-1*. Pro získání žádaných elektrických vlastností je polovodičový materiál dotován cizími atomy, tím se výrazně navýší počet nosičů náboje a silně vzroste vodivost látky.[1][31]



Obr. 1.1-1 Fotovoltaický jev [33]

Generace volných nosičů náboje a jejich následná separace silným elektrickým polem PN přechodu má za následek napěťový rozdíl mezi kontakty solárního článku o velikosti cca 0,5V a po připojení vnějšího obvodu, tímto obvodem protéká stejnosměrný elektrický proud, který je přímo úměrný intenzitě dopadajícího slunečního záření a také celkové ploše článku. Základním požadavkem kladeným na solární články je schopnost pohlcovat sluneční záření v co nejširší spektrální oblasti a také co nejefektivnější využití energie fotonů. Aby docházelo k fotovoltaickému jevu, musí být energie fotonu větší než 1,1 eV a tudíž vlnová délka dopadajícího záření menší než 1105nm. Pokud by energie fotonu byla menší, foton materiálem projde, aniž by došlo k jeho absorpci a tím vzniku volného nosiče náboje. Princip činnosti fotovoltaického článku je uveden na *Obr. 1.1-2*. [1][32]



Obr. 1.1-2 Princip činnosti FV článku [4]

1.2 Konstrukce, výroba a vývoj fotovoltaických článků a panelů

V současné době jsou nejvíce rozšířeny křemíkové fotovoltaické články, jak monokrystalické, polykrystalické tak i amorfnní. Při výrobě článků se využívá mnoha výhod křemíku, mezi které patří hojně zastoupení v zemské kůře, díky čemuž je snadno dostupný, levný a je nejvíce používaným a také nejlépe prozkoumaným polovodičem. [1]

1.2.1 Výroba křemíku

Surový křemík se vyrábí v obloukové peci a to z křemičitého písku, redukcí uhlíkem. V jednotlivých úrovních pece probíhají různé chemické reakce a směrem dolů teplota stoupá. Na dně pece je teplota cca 2000°C a hromadí se zde roztavený křemík, který je v pravidelných intervalech odpouštěn. Takto získaný surový křemík má čistotu až 99%, avšak v polovodičové technologii je zapotřebí mnohem vyšší čistota a proto je zapotřebí surový křemík vyčistit a to lze metodami založenými na zkapalnění křemíku a jeho následnou destilací, tímto způsobem získáme křemík s vysokou čistotou, která postačuje pro výrobu FV článků (obsah nečistot řádově 10^{-6}). Nejpoužívanější technologií čištění je technologie Siemens. Po vyčištění obvykle vzniknou hrudky čistého křemíku. [1]

Výroba polykrystalických ingotů je nejjednodušší a spočívá v roztavení materiálu a jeho následném nalití do formy, kde se nechá definovanou dobu chladnout, tak aby nedocházelo ke vzniku monokrystalických zrn a aby se v materiálu vyskytovalo minimální množství dislokací, pnutí apod. Hranice zrn a další krystalické poruchy tvoří potenciálové bariéry pro pohyb elektronů a je zapotřebí je minimalizovat. Výroba monokrystalu je náročnější, spočívá v ponoření malého monokrystalu do taveniny o teplotě 1415°C a jeho následném otáčení a tažení ven z taveniny v interní atmosféře se sníženým tlakem, tento postup je nazýván Czochralského metoda. Výstupem Czochralského metody je ingot monokrystalického křemíku uvedený na Obr. 1.2-1. [1]



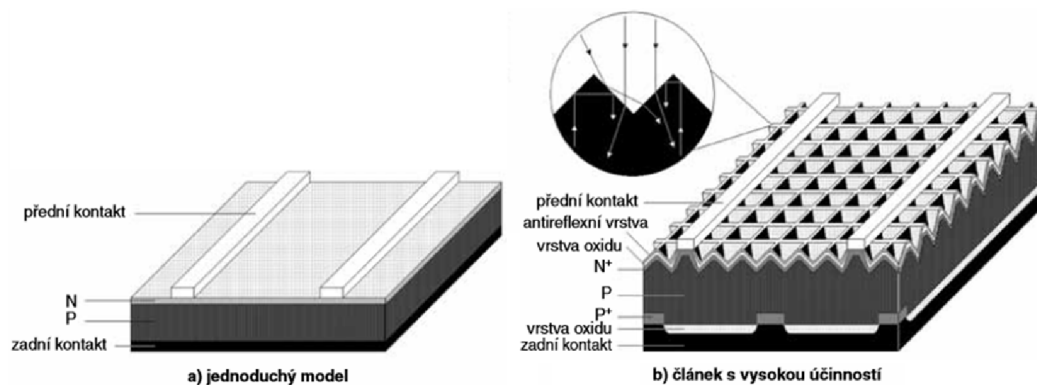
Obr. 1.2-1 Ingot monokrystalického křemíku [4]

Vzniklý mono- či polykrystalický ingot, je nakonec příčně rozřezán na destičky, tvořící základ FV článků. Díky vývoji řezacích technologií lze řezat destičky o tloušťce až 100 μ m. Následně je povrch plátků vyleštěn a odleptán, aby se odstranili nepravidelnosti a nečistoty.

1.2.2 Fotovoltaické články

Jak již bylo uvedeno, jedná se vlastně o velkoplošnou polovodičovou diodu, která má PN přechod orientován kolmo k čelní ploše. Difuze příměsí donorů a akceptorů pro vytvoření PN přechodu probíhá v difuzních pecích. Přední strana FV článku bývá následně opatřena antireflexní úpravou povrchu pro minimalizaci odrazu a zajištění maximálního využití dopadajícího záření. [1]

Aby přední kontakt zakrýval co nejmenší plochu článku, bývá vytvořen ve tvaru mřížky či hřebínku. Zadní kontakt bývá standardně celoplošný. Kontakty jsou většinou nanášeny sítotiskem, popř. vakuovým napařováním, jednoduchý model FV článku je uveden na Obr. 1.2.-2. Pouze pro speciální články jsou kontakty vnořené do materiálu polovodiče. [1]

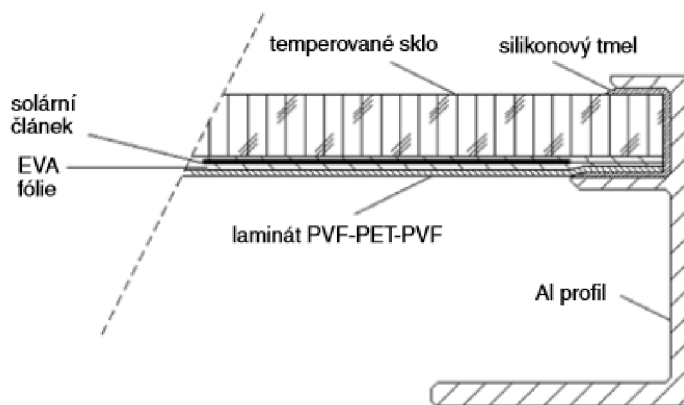


Obr. 1.2-2 Schéma jednoduchého a vysoce účinného křemíkového FV článku [1]

Pro zvýšení účinnosti se u kvalitnějších článků provádí mnoho konstrukčních zdokonalení patrných z obrázku výše, tj. např. vrstva oxidu pro lepší odvedení náboje, vyleptaná struktura malých jehlanů pro dokonalejší pohlcení fotonu a zabránění jeho zpětného odrazu. Některé články jsou oboustranné a záření tak může dopadat z obou stran.[1]

1.2.3 Fotovoltaické panely

Protože samotné články by podléhaly vlivům prostředí a napětí samotného článku je pro praktické využití příliš nízké (0,5V) jsou jednotlivé články spojovány v sério-paralelní kombinaci, která tvoří výsledný FV panel, tak aby pro definované osvětlení panel poskytoval požadovanou velikost stejnosměrného napětí a výkonu. Maximální výkon je limitován velikostí celkové plochy FV panelu. Běžná konstrukce FV panelu je zobrazena na Obr. 1.2-3. [24][31]



Obr. 1.2-3 Řez fotovoltaickým panelem [1]

Na přední straně panelu je kalené temperované sklo, které je mechanicky velmi odolné proti nárazu i velkým kroupám a také rychlým změnám teplot. Na sklo se dále nanáší plastová EVA fólie, která vyniká svojí pružností, jasností, lesklostí, houževnatostí a odolností vůči pnutí. Na EVA fólii se skládají propojené FV články, ty se následně překryjí další vrstvou EVA fólie a zadní stěnu tvoří laminátová kompozice, jež je charakteristická vysokou odolností vůči povětrnostním podmínkám a má dobré mechanické vlastnosti. Poté je odčerpán vzduch mezi jednotlivými vrstvami a panel se zahřeje tak, aby se EVA fólie roztekla a zalila FV články v prostoru mezi předním sklem a zadní stěnou panelu. Nakonec se panely zarámují a zatmelí do hliníkových profilů, které slouží k uchycení k nosným konstrukcím a na závěr se opatří vodotěsnou instalační krabicí se svorkovnicí a překlenovacími diodami případně kabelovým vývodem. Takto zhotovené panely jsou tak utěsněny proti vodě a nečistotám. Životnost kvalitních FV panelů vyrobených na bázi krystalických polovodičů se pohybuje mezi 20 až 30 lety.[1][24][31]

1.3 Typy fotovoltaických systémů

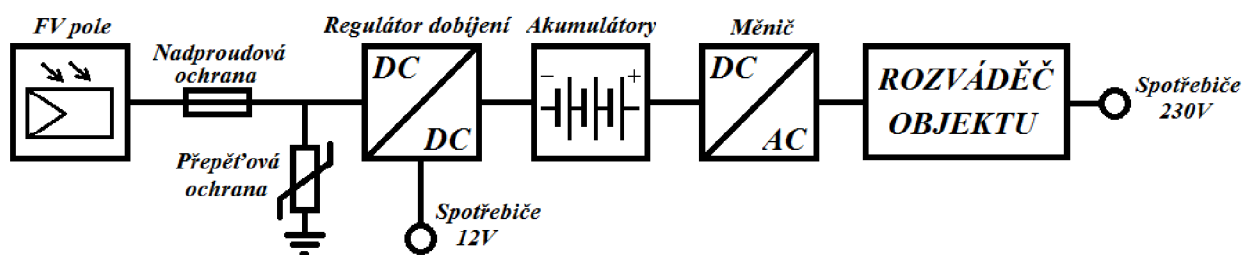
FV systémy můžeme rozdělit podle velikosti a využití instalovaných jednotek do tří skupin:

1.3.1 Autonomní systémy (grid-off)

Využívají se nejčastěji v místech, kde není možné nebo by bylo příliš nákladné zajistit dodávku elektrické energie z distribuční sítě a to např. na odlehlých chatách, zahradních domcích, odlehlých průmyslových objektech, karavanech, jachtách apod. Na těchto místech je obvykle zapotřebí střídavého napětí 230V, což lze zajistit fotovoltaickým ostrovním systémem odpovídajícího výkonu. Při budování ostrovního systému je vhodné volit spotřebiče napájené stejnosměrným proudem, toto však nelze ve všech případech a proto je nutné použít napěťový měnič. Dalším důležitým faktorem je spotřeba elektřiny, čím menší bude celková spotřeba, tím menší budou požadavky na výkon fotovoltaických panelů, na akumulátory a také bude instalace levnější. Výkony autonomních systémů se pohybují mezi 10 až 10000 Watty špičkového výkonu. [5][27][31][32]

Rozlišujeme 3 základní typy:

- Systémy s přímým napájením*- elektrická zařízení jsou připojena k fotovoltaickému modulu pouze přes střídač nebo regulátor napětí a jejich funkčnost je zajištěna po dobu dostatečné intenzity slunečního záření [5][31]
- Systémy s akumulací elektrické energie*- jsou vybaveny speciální akumulátorovou baterií, protože potřeba elektrické energie nastává i v době bez slunečního záření. Pro zajištění dlouhé životnosti akumulátoru je optimální nabíjení a vybíjení zajištěno regulátorem dobíjení. Tímto systémem lze napájet jak stejnosměrné spotřebiče, tak i běžné síťové spotřebiče a to pomocí napěťového střídače. [5][31] Ilustrační schéma tohoto systému je na Obr. 1.3-1.
- Hybridní ostrovní systémy*- používají se tam, kde je nutné zajistit celoroční provoz a kde se občas používá zařízení s vysokým příkonem. Během zimních měsíců vyrobí fotovoltaický systém menší množství elektřiny než v letních měsících, proto je nutné, aby byly systémy navrženy na zimní provoz, což vede ke zvýšení instalovaného výkonu a tím i zvýšení nákladů. Nejvhodnější alternativou je rozšíření systému doplňkovým zdrojem elektrické energie jako např. větrnou či vodní elektrárnou, elektrocentrálou a v ojedinělých případech i elektrickou sítí. [5][31]

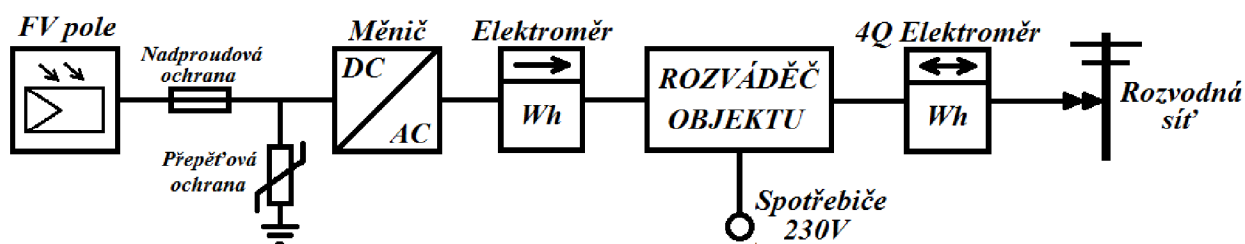


Obr. 1.3-1 Ostrovní systém s akumulací elektrické energie

1.3.2 Systémy připojené na síť (on-grid)

Jsou nejvýznamnější skupinou systémů. Důvodem připojení fotovoltaických systémů k relativně kvalitní a stabilní elektrické síti není nedostatek elektrické energie, ale ekologický a ekonomický přínos, zejména v bezemisní výrobě. Tyto systémy jsou zpravidla budovány na rodinných domech či průmyslových objektech a vyrobená energie je buď přímo spotřebována v daném objektu, nebo prodána do distribuční sítě. Špičkové výkony těchto systémů se pohybují v rozmezí jednotek až stovek kilowatt. [5][29][31][32]

U tohoto systému se setkáváme s dvojitým způsobem využití vyrobené energie. Prvním typem jsou systémy, které pokrývají vlastní spotřebu objektu, přebytky vyrobené energie jsou prodávány a nedostatky dokupovány ze sítě, tyto systémy se skládají z fotovoltaických panelů připojených přes napěťový měnič, nadproudovou ochranu a přepětovou ochranu do rozvaděče v objektu. Aby bylo možné dodávat energii pro vlastní spotřebu a přebytky prodávat, musí být solární systém připojen přes samostatný elektroměr a celý objekt připojen k síti přes čtyř kvadrantový elektroměr. Dalším typem jsou systémy pro prodej elektrické energie do sítě, obsahují pouze fotovoltaické panely připojené přes napěťový měnič, nadproudovou ochranu, přepětovou ochranu, samostatný elektroměr ještě před hlavní elektroměr objektu pro odečet vyrobené energie, která je veškerá dodávána do distribuční sítě za výkupní ceny. Ilustrační schéma systému „on-grid“ je uvedeno na Obr. 1.3-2. [5][27][31][32]



Obr. 1.3-2 On-grid systém s prodejem přebytků do sítě

1.4 Prvky fotovoltaického systému

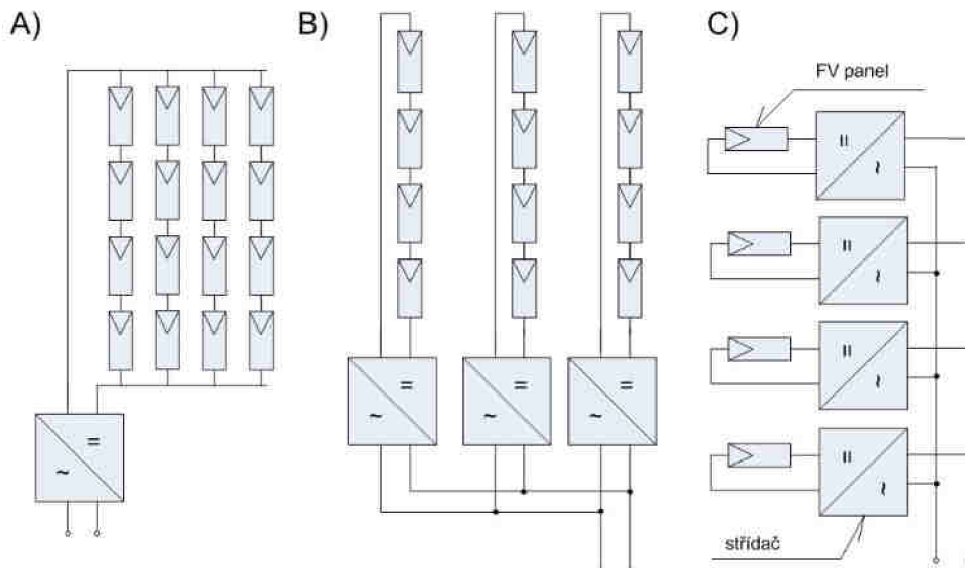
Každý fotovoltaický systém, který je instalován na budovách, volných prostranstvích či jiných místech potřebuje pro svoji správnou funkčnost a zabezpečení dodávky kromě FV panelů také ostatní prvky, které slouží ke zpracování, rozvedení a monitoring vyrobené elektrické energie. Tyto prvky umožňují měnit stejnosměrný proud na střídavý, transformovat napětí z 12 či 24V na 230V, regulovat nabíjení akumulátorů, měřit a regulovat množství vyrobené elektrické energie a v neposlední řadě dodávat nadbytečnou elektrickou energii do distribuční sítě.

Základem FV systémů je generátor tvořený soustavou FV panelů, které jsou vzájemně propojené tak, aby bylo dosaženo požadovaných parametrů, tj. napětí a proudu, vyrobená energie je následně rozváděna, případně měněna na energii střídavou. Níže budou popsány jednotlivé prvky jak ostrovních systémů, tak i systémů připojených na síť.

1.4.1 Měníče napětí

Jinak nazývané invertory či střídače jsou základním elektrickým zařízením každého FV systému, jenž napájí spotřebiče na střídavý proud. Tyto měniče zajišťují konverzi stejnosměrného proudu na střídavý proud s požadovanými parametry a kvalitou. Jsou-li na vstup měniče přímo připojeny FV panely, je zapotřebí zajistit jejich optimální provoz sledováním bodu maximálního výkonu. Pokud systém pracuje paralelně s distribuční sítí, je nezbytné splnění všech požadavků na zajištění bezpečnosti provozu, mezi které patří sledování napětí, frekvence a impedance sítě, dále vypnutí dodávky při poruše, bezpečné odpojování a případné galvanické oddělení. Tyto funkce mohou být splněny buďto samotným střídačem nebo pomocí dalších zařízení. Pro monitorování provozu systému se ke střídačům, pokud to umožňují, připojují datové komunikační linky. Kromě splnění síťových požadavků je kladen důraz na jejich účinnost (90-98%), bezporuchovost, odolnost, teplotní rozsah použití, rozměry, hmotnost, jednoduchost instalace a další. Existují střídače určené jak pro práci paralelně se sítí, tak i v autonomních systémech nebo pro kombinovaný provoz. [3][28][31][32]

Rozlišujeme jednofázové a třífázové měniče a dle výkonu dělíme na modulové (Obr. 1.4-1C), řetězcové neboli stringové (Obr. 1.4-1B) a velké centrální střídače (Obr. 1.4-1A). Modulové střídače se používají jen zřídka a to zejména u malých systémů, s řetězcovými střídači se setkáme u středních elektráren a v případě velkých elektráren jsou používány jak centrální střídače, tak i větší množství řetězcových střídačů. Pro galvanické oddělení výstupu mají některé střídače vestavěný transformátor, který sice mírně snižuje účinnost, ale je nezbytný v případě připojení tenkovrstvých FV panelů a navíc zvyšuje bezpečnost celé instalace. [28][32]



Obr. 1.4-1 Centrální (A), řetězcové (B) a modulové střídače (C) [3]

V závislosti na provozních podmínkách FV panelů, zejména teplotě a intenzitě záření, se posouvá bod maximálního výkonu na V-A charakteristice. Kromě levných regulátorů nabíjení, které pracují s konstantním napětím FV panelů, je většina vyráběných střídačů vybavena algoritmem sledování bodu maximálního výkonu (MPP trackerem) pro zajištění maximální výtěžnosti dostupné energie. Funkce algoritmu spočívá v měření vstupního výkonu, provedení drobné odchylky vstupních veličin, porovnání s předchozím stavem a na základě zjištěné odchylky dochází ke změně vstupního odporu. Průběh výstupního proudu u nejjednodušších měničů je obdélníkový, což není vhodné pro všechny spotřebiče, ale dostačující pro odporové zátěže, lepší měniče mají na výstupu proud s lichoběžníkovým průběhem, což už je vhodné pro většinu spotřebičů a nejkvalitnější měniče mají průběh výstupního proudu čistě sinusový. [28][31][32]

1.4.2 Akumulátorová baterie

Používá se zejména v autonomních systémech a je určena ke skladování elektrické energie vyrobené FV panely pro případ, že elektrická energie vyráběná FV panely nepokryje aktuální spotřebu objektu nebo dojde k úplnému výpadku výroby. Nabíjení akumulátoru je zprostředkováno pomocí regulátoru nabíjení v době, kdy je vyrobené elektrické energie nadbytek. Pro FV systémy jsou zvláště vyráběny „solární akumulátorové baterie“, které se vlastnostmi podobají trakčním bateriím a výrazně se liší od baterií startovacích, které nejsou pro FV systémy vhodné. Mezi požadavky kladené na akumulátorové baterie pro FV systémy patří minimální samovybíjení, dobrá účinnost, vhodnost pro cyklický provoz, schopnost snášet hlubší vybíjení, minimální nároky na údržbu, dlouhá životnost a teplotní stabilita. Nejvíce používané jsou olověné akumulátory, pro speciální aplikace lze použít nikl-kadmiové nebo nikl-železné články a v případě odběru malých výkonů se nabízí Ion-lithiové nebo alkalické články. [30][31]

1.4.3 Solární regulátor

Používá se zejména v autonomních systémech a slouží pro zajištění optimálního chodu FV systému. Protože životnost akumulátorové baterie silně závisí na způsobu nabíjení a vybíjení, je hlavním úkolem regulátoru řídit nabíjecí případně vybíjecí cykly akumulátoru, dále také zamezit ztrátám elektrické energie, maximálně využít solární energii a předejít poškození nebo zničení některé části FV systému. Nejvyšší kvalitu regulátorů jsou stejně jako měniče vybaveny MPP trackerem. Většina regulátorů je vybavena ochranou proti zpětnému vybíjení přes solární panely během noci, tuto funkci plní Shottkyho dioda s malým úbytkem napětí. Další důležitou vlastností je automatické odpojení zátěže od akumulátorové baterie a to při velmi nízkém napětí na baterii, při proudovém přetížení a při zkratu v obvodu zátěže. [29][31]

1.4.4 Nosné konstrukce

FV panely je možné instalovat několika způsoby a to v těsném spojení s obvodovou konstrukcí budovy (náhrada střešní krytiny nebo fasádních obkladů) nebo FV panely tvoří rozhraní vnějšího a vnitřního prostředí, ale nejběžnějším způsobem je instalace v otevřené poloze, kdy se panely nestávají přírodní součástí budovy, nebo instalace na volném prostranství. FV panely se upevňují na nosné konstrukce, které zajišťují jejich polohu. Tyto konstrukce musí odolávat různým klimatickým vlivům a značné zátěži, z toho důvodu se zhotovují z korozivně odolných materiálů, vyznačujících se značnou pevností, přiměřenou hmotností a snadnou zpracovatelností. Výhodnými materiály jsou slitiny hliníku nebo oceli s příslušnou povrchovou úpravou. [3][27]

Rozeznáváme několik typů nosných konstrukcí:

- *Konstrukce pro sedlové střechy*
 - Jsou vhodné pro menší instalace na rodinných domech a budovách se sedlovou střechou orientovanou k jihu či jihozápadu se sklonem přibližně 35°. Hlavním nosným prvkem jsou hliníkové profily, které se pomocí speciálních háků upevňují ke konstrukci střechy. Díky jednoduchosti, snadné montáži a nízké ceně je tato konstrukce nejpoužívanějším typem. [3]
- *Konstrukce pro ploché střechy*
 - Základ tvoří ocelové pozinkované profily trojúhelníkového tvaru, které jsou podélně spojeny hliníkovým profilem pro uchycení FV panelů. Ke střeše se konstrukce připevňují buďto chemickými kotvami, tzn. napevno, nebo jsou zatíženy dlaždicemi či betonovými bloky. Konstrukce musí být zatížena či upevněna tak, aby odolávaly silnému větru. [3]
- *Konstrukce pro volná prostranství*
 - U větších elektráren budovaných na volném prostranství se používá stejné řešení jako u plochých střech, liší se pouze tím, že nosné konstrukce jsou napevno spojeny se zemí pomocí závrtných šroubů, pozinkovaných profilů zaražených do země nebo jsou připevněny k betonovým základům. [3]
- *Polohovatelné systémy neboli trackery*
 - Jedná se o nejlépe energeticky výtěžný způsob uchycení FV panelů. Pomocí trackeru se panely automaticky otáčejí a naklání ke slunci dle jeho astronomické dráhy, což umožňuje maximální energetickou výtěžnost elektrárny. Oproti běžným instalacím se uvádí 30-35% nárůst vyrobené energie, avšak nevýhoda spočívá ve vysokých investičních nákladech, vlastní spotřebě systému a nutnosti údržby. [3]

1.4.5 Ochrana před bleskem

Je důležitá zejména v oblastech s častým výskytem bouřek a na vyvýšených objektech, rozlišujeme dva druhy ochrany:

- *Vnější ochrana*
 - Je tvořena hlavně bleskosvody umístěnými na vrcholcích střechy a uzemněnými svody, ke kterým mohou být připojeny vodivé části (rámy) i nosné konstrukce FV panelů, avšak dle nových poznatků se nejčastěji provádí tzv. oddálený hromosvod, kdy konstrukce FV systému nejsou propojeny s hromosvodnou sítí, naopak se instalují v určité vzdálenosti, obvykle 40-60cm. Tato ochranná síť svádí elektrický výboj blesku do země a zamezí tak vzniku škod uvnitř objektu. V objektech kde není provedena ochrana proti blesku, se doporučuje uzemnění alespoň regulátoru či měniče dostatečně dimenzovaným vodičem. [3][32]
- *Vnitřní ochrana*
 - Je instalována pro zamezení poškození elektrických zařízení, např. střídače, vlivem přepětí, které vznikne nejen po přímém úderu blesku, ale také ve vodivých smyčkách propojených modulů. Tyto přepětí jsou přepět'ovými ochranami na vstupech střídače, příp. regulátoru, odváděny zemnicím vedením do země. Nejčastěji se používají svodiče přepětí II. stupně, bohužel však z hlediska velikosti provozních napětí nelze ve většině případů použít ochrany pro běžné instalace a je nutné použít specializované ochrany. [3][32]

Návrh ochrany FV systémů vychází z normy ČSN EN 62305, dle které musí být ochrana provedena na základě požadavků skupiny III, přičemž FV systém nesmí zhoršovat ochranu objektu před bleskem a FV systémy mají být chráněny oddálenou jímací soustavou. [32]

1.4.6 Elektrická vedení

- *Vodiče a kabely*
 - Používají se buďto drátové nebo lankové vodiče a kabely dimenzované na vhodný průřez pro minimalizaci elektrických ztrát vzniklých průchodem proudu a zamezení nežádoucího zahřívání vodičů a tím i propojovacích prvků, kterým se zhoršují jejich mechanické vlastnosti. Kabely s drátovými vodiči jsou používány u pevných instalací, např. na straně spotřebičů, a lankové vodiče jsou používány v místech vhodných pro jejich vysokou ohebnost, např. propojení FV modulů. Velký bezpečnostní význam má vhodná izolace vodičů, resp. kabelů, nejen že zamezuje osobám a předmětům v kontaktu s vodiči pod napětím, ale také brání vzniku zkratu ve vedení a tím i vzniku elektrického oblouku. Izolace vodičů a kabelů instalovaných ve vnějším prostředí musí odolávat klimatickým vlivům a také vlivu UV záření, nejčastěji se aplikují vodiče s dvojitou izolací. [32]

- *Propojovací prvky*
 - Propojování či připojování vodičů se provádí buď pomocí zásuvných konektorů nalisovaných na koncích vodičů, nebo pomocí šroubovacích ok, která se taktéž lisují. Pájení propojovacích prvků není přípustné, protože pájka by se mohla roztavit a způsobit špatný kontakt. Stejně jako kabely musí odolávat extrémním podmínkám provozu.
- *Mechanické upevnění*
 - V nejjednodušším případě se provádí pomocí spon či přichytek, avšak nákladnějším, ale mechanicky odolnějším řešením je umístění vodičů a kabelů do instalačních trubek a lišt, případně kabelových kanálů.
- *Jištění a spínací prvky*
 - Jištění hraje významnou roli u FV systémů s panely zapojenými do třech a více stringů, protože v případě zkratu na jednom z nich zbylé stringy stále generují proudy a jejich součet by mohl přesáhnout hodnotu, na kterou jsou dimenzovány kabely a FV panely v poškozené stringu a mohlo by dojít k jejich trvalému poškození. Pro ochranu proti zkratovému proudu uvnitř větve lze použít také zpětné diody. Důležité je také vhodné dimenzování jištění samotného střídače a připojených spotřebičů. Nezbytnou součástí celého systému jsou správně dimenzované spínací prvky, které umožňují odpojení systému, případně jeho části, při opravě či manipulaci.[11]

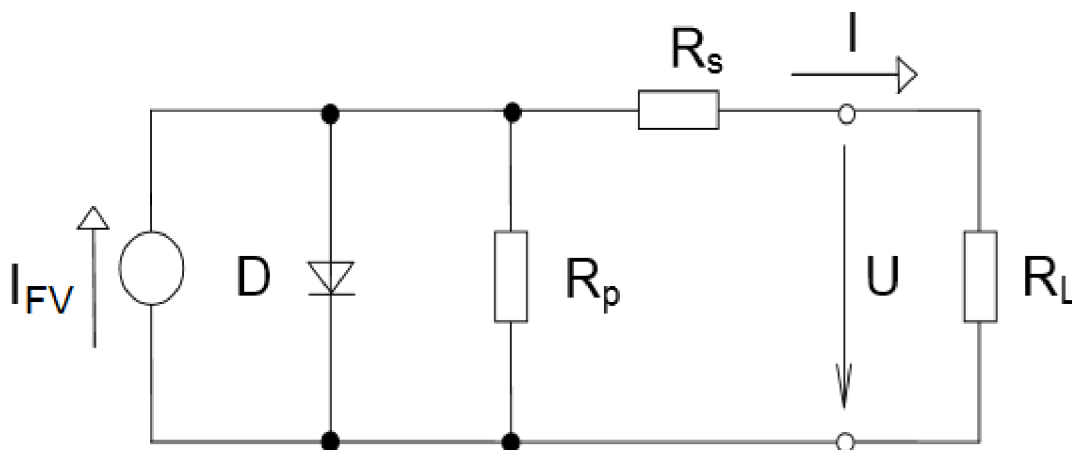
1.4.7 Ostatní prvky FV systému

Jedná se nejen o prvky, bez nichž by systém nemohl fungovat, ale také o podpůrné či monitorovací zařízení. Mezi nezbytné prvky patří spínací, jistící a ochranná zařízení, která musí být navrhována a dimenzována na specifický průběh elektrických veličin v systému. Pro informaci o fungování systému se používá celá řada monitorovacích prvků a zařízení, které dávají uživateli představu o aktuálním stavu výroby, nabití akumulátorů, spotřebě energie a dalších informacích o stavu systému. U rozsáhlejších systémů se setkáváme se zařízeními pro dálkový dohled a řízení. Dalším prvkem FV systémů bývají rozváděče a to pro vnitřní i vnější použití, umísťují se do nich měniče, regulátory, jističe, monitorovací zařízení a další. Řada výše uvedených prvků je umístěna ve vnějším prostředí a jsou na ně kladeny specifické požadavky, jako odolnost vůči povětrnostním vlivům, odolnost vůči UV záření a teplotním změnám, dále musí být komponenty navrženy na dobu životnosti instalace, která bývá 20 a více let. Také je zapotřebí dodržení požadavků na souběh vedení nízkého a vysokého napětí, stejnosměrného a střídavého proudu a také dostatečné oddělení výkonových a datových cest. [32]

1.5 Elektrické parametry fotovoltaických článků

1.5.1 Matematický model FV článku

Abychom mohli zjistit jednotlivé parametry FV článku, nahrazujeme tento článek jednoduchým modelem, jehož části jsou principiálně dobře známé a lze je snadno popsat. Jedná se o analytický popis FV článku z hlediska jeho principu. Náhradní schéma FV článku je zobrazeno na Obr. 1.5-1.



Obr. 1.5-1 Náhradní schéma FV článku [27]

Ozářená oblast přechodu PN generuje proud I_{FV} , oblast typu P se nabíjí kladně a oblast typu N záporně. Tím dochází k propustné polarizaci přechodu a část generovaného proudu protéká zpět diodou D. Svodový odpor R_p modeluje technologické nedostatky neboli mikrosvody přechodu PN a sériový odpor R_s vyjadřuje vliv odporu materiálu a proudových sběrnic. Výstupní napětí U je rovno napětí U_D na diodě sníženému o úbytek napětí na sériovém odporu. Zátěž je reprezentována odporem R_L . [3][33]

Výstupní proud FV článku I je dán vztahem:

$$I = I_{FV} - I_D * \left[\exp\left(\frac{U+I*R_S}{k_B*T}\right) - 1 \right] - \frac{U+I*R_S}{R_p} \quad (1)$$

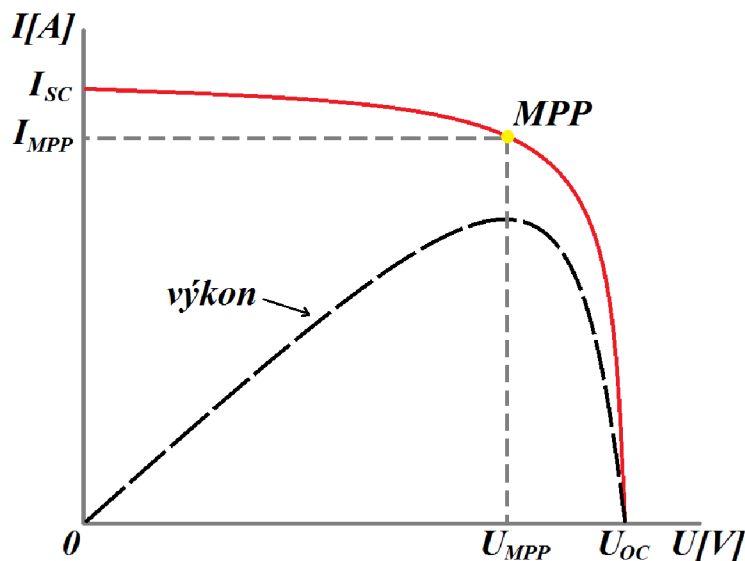
, kde je k_B – Boltzmannova konstanta, I_{FV} – proud závislý na intenzitě osvětlení, I_D – proud diodou a T – teplota

Z uvedeného vztahu je patrný silný vliv sériového odporu R_s na voltampérovou charakteristiku FV článku, sériový odpor snižuje výstupní proud a tím i účinnost článku. [33]

Pro sestavení matematického modelu je třeba mít k dispozici celou řadu parametrů, které je nejčastěji zapotřebí změřit nebo získat od výrobce. [33]

1.5.2 Voltampérová charakteristika FV článku

Jak již bylo řečeno v úvodu, lze si FV článek představit jako velkoplošnou polovodičovou diodu a tudíž můžeme stejně jako u ostatních polovodičů popsat parametry článku voltampérovou charakteristikou. Jedná se o základní informaci o účinnosti FV článků a lze z ní vyčíst některé základní veličiny charakterizující daný FV článek, na průběh V-A charakteristiky má vliv především hodnota intenzity slunečního záření a teplota. Na Obr. 1.5-2 je zobrazena V-A charakteristika FV článku pro určitou teplotu a hodnotu osvětlení. [13]



Obr. 1.5-2 V-A charakteristika FV článku

1.5.3 Proud nakrátko I_{sc} (short circuit)

Nazývá se též fotoelektrický nebo zkratový proud. Jedná se o maximální hodnotu proudu, jež je článek schopen dodat při daném osvětlení a nulovém napětí, je to charakteristická hodnota vyznačená ve V-A charakteristice. Jeho velikost závisí na intenzitě osvětlení, teplotě, spektrální citlivosti a ploše FV článku, s rostoucí teplotou hodnota I_{sc} klesá. Jeho velikost se pohybuje v řádu jednotek ampér, u největších dostupných článků může při maximálním osvětlení dosahovat až desítek ampér. [13][33]

1.5.4 Napětí naprázdno U_{oc} (open circuit)

Je hodnota napětí na svorkách panelu při nulovém proudu I , tj. bez připojené zátěže. Jedná se o maximální hodnotu napětí při dané intenzitě osvětlení a teplotě a nabývá hodnot okolo 1 voltu, u FV panelů až desítek voltů. Napětí naprázdno je velice závislé na teplotě a sériovém odporu, s rostoucí teplotou klesá, současně s ním klesá i napětí v bodě maximálního výkonu, což způsobuje pokles maximálního výkonu a tedy i účinnosti FV článku. Pro FV články z krystalického křemíku je pokles U_{oc} přibližně 0,4%/K, a pokles účinnosti o cca 0,5%/K. [13][32]

1.5.5 Pracovní bod PB

Tento bod nalezneme na V-A charakteristice a značí nám, v jaké oblasti zrovna FV článek pracuje, jeho poloha je silně závislá na vlastnostech zátěže, napětí a proudu daného článku a také na teplotě. Při provozu za zhoršených chladících podmínek (bezvětrí) a v oblastech kde teplota vzduchu přesahuje 40°C, může dojít ke zvýšení teploty povrchu článku až na 80°C, což má za následek změny elektrických vlastností, které vedou k poklesu svorkového napětí článku na zatěžovací charakteristice. Následkem je snížení dodávaného výkonu do zátěže, dochází k tomu zejména při největší intenzitě slunečního záření, a tudíž můžeme ztratit až 75% z dosažitelné denní výroby elektrické energie. Za těchto podmínek se používá kompenzační metoda, která je založena na principu řízení optimálního odporu zátěže (MPP-tracker). Cílem je, aby byla poloha pracovního bodu totožná s polohou bodu maximálního výkonu, viz níže. Pokud by pracovní bod ležel v bodě zkratového proudu nebo napětí naprázdno, nedodával by FV článek žádný výkon. [13][33]

Jak již bylo řečeno, závisí poloha pracovního bodu na vlastnostech zátěže, pokud se jedná o obecnou zátěž, je poloha PB dána odporem zátěže a pokud článek pracuje v nabíjecím režimu, tj. do akumulátoru je poloha PB dána napětím akumulátoru. [13][33]

1.5.6 Maximální výkon MPP (maximal power point)

Udává maximální výkon, který je FV článek schopen dodávat, při daných povětrnostních podmínkách. Bod MPP leží zhruba uprostřed ohybu V-A charakteristiky a je udáván napětíovou a proudovou souřadnicí. Zařízení, které odebírá energii z FV článku, by jej mělo zatěžovat takovým způsobem, aby pracoval v nejbližším okolí tohoto bodu, jen tak lze optimálně využít energii dopadajícího záření. [13][32]

Tento výkon lze vyjádřit vztahem:

$$P_{MPP} = U_{MPP} * I_{MPP} \quad (2)$$

, kde P_{MPP} je maximální výkon, U_{MPP} napětí a I_{MPP} proud, při kterých FV článek dodává maximální výkon.

1.5.7 Efektivita výroby elektrické energie FF (Fill Factor)

Efektivita neboli celková účinnost výroby elektrické energie je dána tzv. činitelem plnění (FF), který je definován jako poměr mezi maximálním výkonem P_{MPP} a výkonem daným napětím naprázdno U_{OC} a proudem nakrátko I_{SC} . Abychom zjistili aktuální činitel plnění daného panelu, je zapotřebí vstupní hodnoty pro jeho výpočet změřit, z čehož se odvíjí přesnost celého postupu. Tento činitel je závislý na morfologii materiálu, kvalitě kontaktů a odporu aktivní polovodiivé vrstvy. Je klíčovým parametrem při hodnocení výkonnosti a účinnosti FV článků. [13][33]

Je definován vztahem:

$$FF = \frac{U_{MPP} * I_{MPP}}{U_{OC} * I_{SC}} \quad (4)$$

Čím vyšší hodnoty nabývá, tím vyšší výkon je článek schopen dodat do zátěže, v ideálním případě by měl být roven 1, ale obvyklá hodnota FF se pohybuje u běžných komerčních článků okolo 0,8. Podle jeho velikosti lze usoudit, jak kvalitní je daný článek. Články s vysokým činitelem plnění se vyznačují nízkým sériovým odporem R_S a vysokým svodovým odporem R_P , což znamená, že generovaný proud je méně rozptýlen na vnitřních ztrátách. [13][33]

1.5.8 Účinnost FV článku EEF

Vyjadřuje účinnost přeměny sluneční energie neboli světelného záření na elektrickou energii. Je závislá na vlastnostech materiálů, z nichž je FV článek či panel vyroben, na intenzitě dopadajícího záření a na velikosti sériového a paralelního odporu. Při malém sériovém odporu R_S účinnost článku s rostoucí intenzitou záření roste a při velkém R_S s rostoucí intenzitou záření klesá. Vlastnosti materiálů ovlivňují zejména spektrální citlivost článku, která udává, jaké vlnové délky slunečního záření je FV článek schopen zpracovat. Účinnost monokrystalických článků se pohybuje v rozmezí 15 až 18% a polykrystalických mezi 13 až 16%. [13][33]

Účinnost FV článku zjistíme dle následujícího vztahu:

$$\eta = \frac{P_{MPP}}{P_{RAD}} = \frac{P_{MPP}}{E * A_C} \quad (5)$$

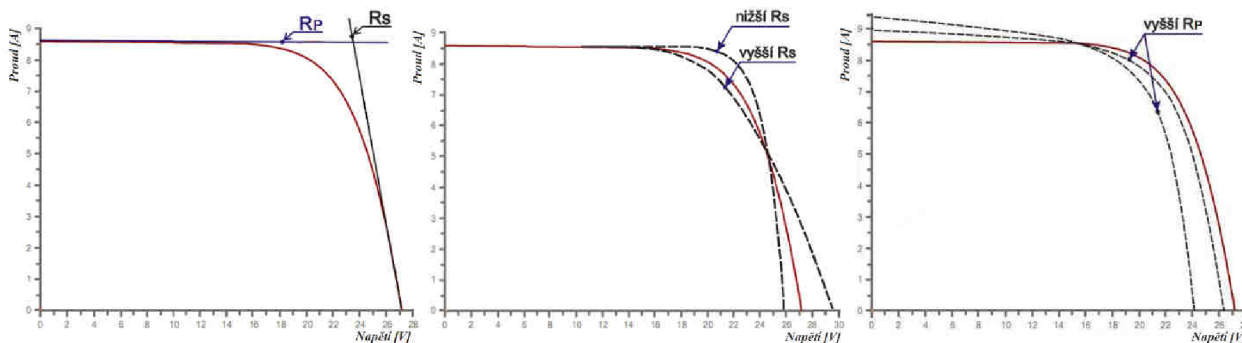
, kde P_{MPP} je maximální výkon, který článek může dodat, P_{RAD} výkon dopadajícího záření, E intenzita slunečního záření a A_C plocha FV článku v m^2 .

1.5.9 Sériový R_S a paralelní R_P odpor článku

Kvalita FV článku závisí mimo jiné na velikosti těchto odporů. Velká hodnota sériového odporu způsobí, že s rostoucím proudem značně roste úbytkem napětí na R_S a klesá svorkové napětí článku i celková účinnost. V případě paralelního odporu požadujeme, aby jeho velikost byla vysoká, pokud je příliš nízká, znamená to, že se jedná o vadný článek, jenž se chová jako by byl uvnitř zkratován. [13][33]

Sériový odpor je odvozen z celkového odporu materiálu polovodiče, odporu kontaktů a propojení. Paralelní odpor vyjadřuje defekty krystalické mřížky, materiálové nedostatky, svodové proudy kolem okrajů článku a další závady, a je také značně ovlivňován vlhkostí. [13][21][33]

Vliv sériového a paralelního odporu je možné pozorovat na níže uvedeném Obr. 1.5-3, kde obě hodnoty určují sklon V-A charakteristiky. Z obrázku je patrné, že sériový odpor je tečnou na napětí naprázdno U_{OC} a ovlivňuje „vertikální“ část, a paralelní odpor je tečnou na zkratový proud I_{SC} a ovlivňuje „horizontální“ část. [21]



Obr. 1.5-3 Vliv sériového R_S a paralelního R_P odporu na tvar V-A charakteristiky [21]

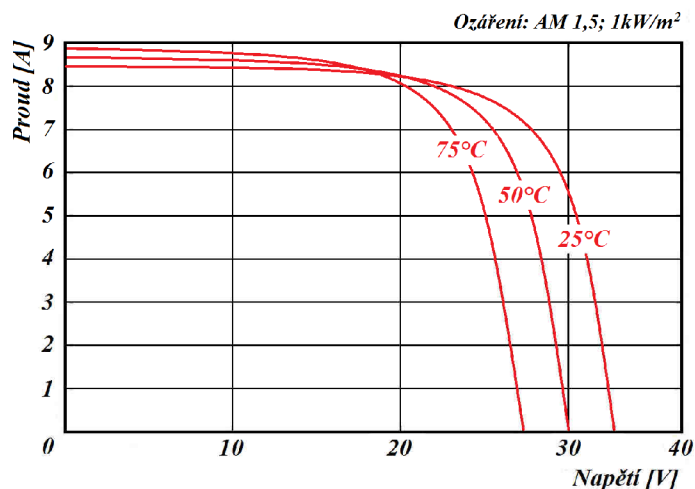
Výše uvedené parametry jsou stejně jako u FV článků charakteristickými parametry FV panelů, tj. U_{OC} , I_{SC} , U_{MPP} , I_{MPP} , FF, η , u některých však nabývají jiných vyšších hodnot. Tyto parametry se udávají za standardních testovacích podmínek, kterými jsou standardní testovací teplota STC = 25°C, intenzita slunečního záření $I = 1000 \text{ W.m}^2$ při definované vzduchové hmotě AM = 1,5. [32]

1.5.10 Neelektrické parametry

1.5.10.1 Teplota T

Není deklarovaným parametrem, ale hraje důležitou roli v přeměně sluneční energie na energii elektrickou a její změny negativně ovlivňují FV článek, proto je nutné při výrobě zajistit co nejmenší reakci daného článku na změnu teploty a konstrukční řešení pro efektivní chlazení. Se zvyšující teplotou klesá účinnost článku a dochází k posunu pracovního bodu, s nárůstem teploty je také spojen nárůst I_{SC} a výraznější pokles U_{OC} , jak je uvedeno na Obr. 1.5-4. [21]

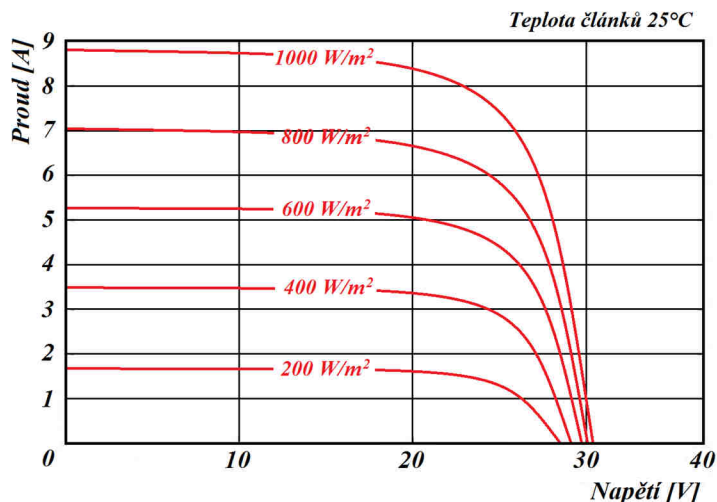
Výrobce v souvislosti s teplotou uvádí teplotní parametr, nazývaný nominální operační teplota NOCT, jehož cílem je určení nejlepších provozních podmínek pro instalaci daného modulu. Tento parametr je nezanedbatelný zejména v extrémních atmosférických podmínkách. [21]



Obr. 1.5-4 Vliv teploty na změnu průběhu V-A charakteristiky

1.5.10.2 Intenzita osvětlení I_{rr}

Energetická přeměna je ovlivněna reakcí materiálu na intenzitu záření dopadajícího na povrch daného článku, z něhož je vyroben. Intenzita osvětlení ovlivňuje celkový okamžitý výkon FV článku a to metodou přímé úměrnosti, kdy s rostoucí intenzitou roste celková účinnost článku a naopak, nárůst výkonu však není nekonečný, ale je omezen charakterem použitých materiálů. Reakce článků (panelů) na spektrum záření závisí na atmosférických podmínkách, typu použitého polovodiče a případně konstrukci. Na Obr. 1.5-5 je uveden vliv intenzity slunečního záření na tvar V-A charakteristiky. [21]



Obr. 1.5-5 Vliv intenzity slunečního záření na změnu V-A charakteristiky

1.5.11 Provozní výkonnost FVE

Nejedná se o parametr definující vlastnosti samotného FV článku či panelu, ale o parametr, který vyjadřuje výtěžnost celé fotovoltaické elektrárny v procentních hodnotách.

Provozní výkonnost je dána vztahem:

$$PR = \frac{E}{((G_E - U_0) * A * \eta_{FV})} \quad (6)$$

,kde

E - celková velikost elektrické energie vyrobené FVE za dané období dle údajů zaznamenaných vhodným měřicím zařízením (Wh)

G_E - celková agregovaná energie slunečního záření, zjištěná z údajů solárního čidla instalovaného v rámci FVE za dané období, dopadající v lokalitě FV elektrárny na plochu FV panelů. V případě použití více čidel, je použit aritmetický průměr všech naměřených veličin. (Wh/m²)

A - celková plocha všech instalovaných FV panelů v rámci FVE (m²)

η_{FV} - účinnost nových FV panelů použitých ve FVE ke konverzi slunečního záření na elektrickou energii zjištěná z datasheetu daného panelu (%)

U_0 - celková agregovaná energie slunečního záření za dané období dopadající v lokalitě FVE na plochu solárních panelů, kterou nebylo možno konvertovat na elektrickou energii a dodat do sítě. (Wh/m²) A to zejména v důsledku odpojení FVE nebo snížení napájecího výkonu PDS nezaviněného zhotovitelem, v důsledku zhotovitelem nezaviněného poškození VN vedení připojovacího FVE do sítě třetí osobou mezi přípojným bodem PDS a oplocením FVE, v důsledku poruchy nebo odpojení distribuční soustavy v daném místě či v důsledku zasněžených modulů a dalších. [3]

2 PORUCHY FOTOVOLTAICKÝCH SYSTÉMŮ

2.1 Defekty fotovoltaických článků

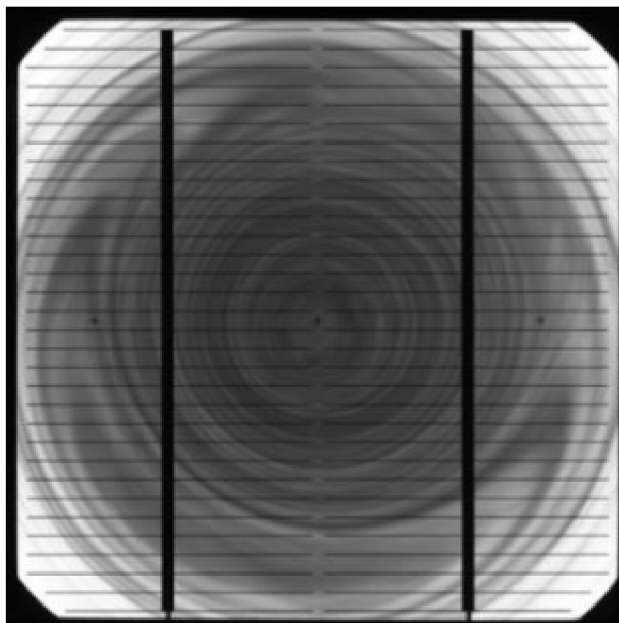
Pro potřeby testování a zkoušení FV článků je zapotřebí znát jejich defekty a příčiny, které způsobují odchylky z vymezeného intervalu požadovaných vlastností. Abychom mohli zjistit, jestli zařízení pracuje správně, musíme znát jeho vlastnosti, které porovnáme s definovanými vlastnostmi a zjistíme případné odchylky.

Defekty může podle jejich vzniku rozdělit do dvou skupin, kterými jsou materiálové a procesní defekty.

2.1.1 Materiálové defekty (*Grow Defects*)

Jedná se o vady FV článků, které vznikají již při výrobě samotného křemíku.

- *Vírové defekty*- Charakteristickým rysem této vady jsou oblasti generující nižší fotoelektrický proud, které jsou uspořádány do soustředných kružnic, dle Obr. 2.1-1. Tyto oblasti vznikají vnikem příměsí, zejména kyslíku, při tažení monokrystalického křemíku. Vlivem kyslíkových příměsí, se kterými rekombinují volné elektrony, dochází ke snížení celkového počtu nosičů a tím i ke snížení účinnosti článku. [14][24]
- *Vnitřní pnutí materiálu*- Je důsledkem špatně řízeného procesu výroby monokrystalického křemíku pomocí Czochralského metody, zejména nerovnoměrným tuhnutím taveniny, způsobeným špatným chlazením. Následkem je deformace plochy, v některých případech až prasknutí a to při relativně malém tepelném namáhání. [14][24]



Obr. 2.1-1 Vírový defekt [14]

2.1.2 Procesní defekty (*Processing Induced Defects*)

Tyto vady FV článků vznikají při technologickém zpracování křemíku pro výrobu článků a způsobují zhoršení elektrických vlastností krystalických křemíkových FV článků.

- *Nehomogenita difuzní vrstvy*- Je způsobená vnikem nečistot během procesu difuze.
- *Mechanické poškození*- dochází k němu při špatné manipulaci s FV článkem, zvláště při zasouvání článků do zásobníku výrobního zařízení, při posunu článku v dopravníku, při ořezávání hran článku, při metalizaci nebo při manipulaci s článkem při konečné diagnostice. [14][24]

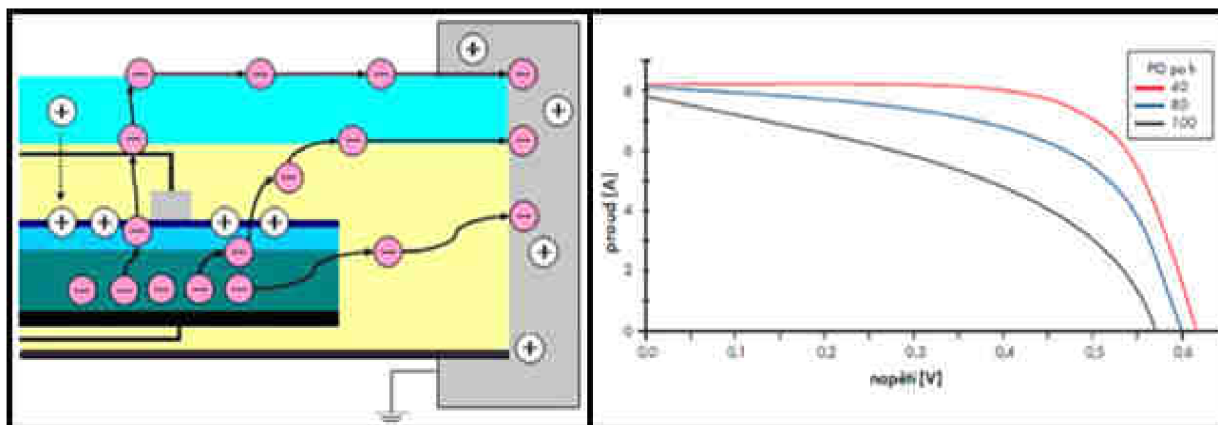
Mezi tento typ poškození patří odštípnuté okraje a nebroušené hrany, které způsobují zkrat přední a zadní strany, chyba metalizace, která je způsobena špatnou technologií sítotisku a způsobuje špatný odvod generovaného proudu z FV článku, skrytý lom neboli prasklina, která nemusí být na první pohled patrná a způsobuje zhoršení elektrických vlastností, vnik prachových částí způsobený nedokonalostmi ve výrobním procesu a poškrábání, čímž dochází k narušení vrchní vrstvy FV článku, může dojít až k narušení P-N přechodu a mikroskopickému lavinovému průrazu. [14][24]

2.2 Defekty fotovoltaických panelů

Vznikají při provozu a výrazně negativně ovlivňují elektrické parametry a tím i účinnost a výkon FV panelů. Nejčastějšími defekty jsou potenciální indukovaná degradace, degradace dopadajícím zářením, delaminace FV panelu, proražení či vyhoření diody, „Hot Spots“ a „Šnečí cestičky, tyto zmíněné budou podrobněji přiblíženy níže. Mezi další defekty FV panelů patří prasklé sklo, způsobené lokálním přehřátím či nevhodnou manipulací, FV panel z článků s různými parametry nebo prasklé články.

2.2.1 Potenciální indukovaná degradace (*PID*)

Jedná se nežádoucí efekt některých solárních panelů (dle výrobce a kvality) nazývaný též jako vysokonapěťový stres. K tomuto jevu dochází zejména u FV modulů, které jsou nejbližše zápornému pólu stringu, a je způsoben vysokým negativním napětím mezi panely a zemí. V závislosti na umístění panelu ve stringu, délkách jednotlivých stringů a typu použitého střídače se potenciál napětí proti zemi může pohybovat mezi ± 200 V a ± 450 V. Rám panelu má nulový potenciál, protože by měl být z bezpečnostních důvodů uzemněn. Zmíněné negativní napětí může způsobit uvolnění elektronů z materiálů FV panelu, jejich migraci do elektrického pole a následné vybití přes rám do uzemnění, důsledkem je polarizace elektrického náboje, která ovlivňuje výkonovou křivku FV panelu. Tento jev je závislý na kvalitě použitých materiálů, je urychlován teplotou a vlhkostí celého systému a má za následek pokles výkonu panelu bez viditelné příčiny, který může dosahovat až 70%. Princip a vliv LID jsou uvedeny na Obr. 2.2-1. Negativním vlivům tohoto jevu lze předcházet uzemněním záporného pólu generátoru, což však s sebou přináší další problémy, kterými jsou bezpečnostní rizika, nutnost měření izolací a galvanické oddělení DC a AC strany, ovšem některé systémy nelze jako uzemněné provozovat vůbec. Dalším opatřením proti PID, dokonce i jeho reverzí je speciální PID Doctor, který způsobí změnu polarity mezi panelem a měničem, čímž by mělo dojít k obrácení jevu a během několika měsíců navrácení panelu do původního stavu, avšak ani toto řešení nezajistí, že se PID po nějakém čase opět neprojeví. [8][17][20]

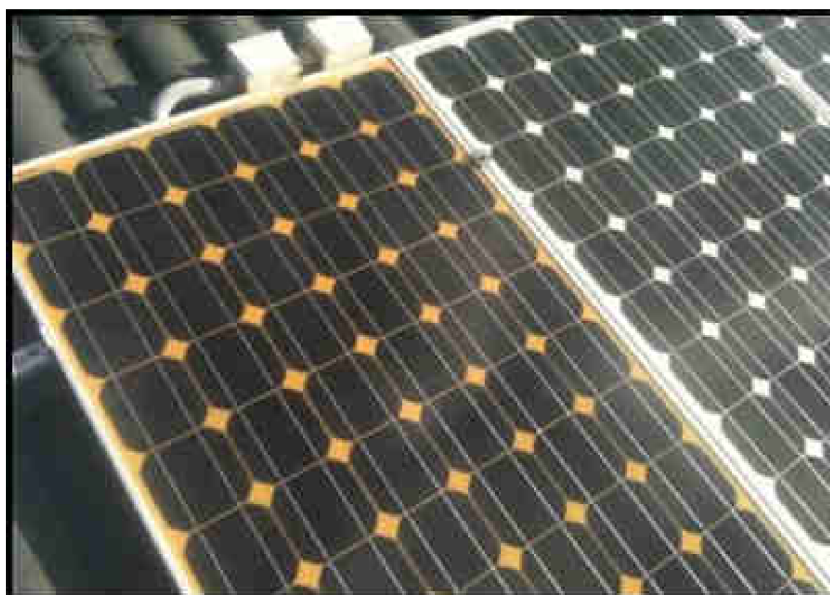


Obr. 2.2-1 Potenciální indukovaná degradace [20][22][19]

2.2.2 Degradace FV panelů dopadajícím zářením (LID)

Tato degradace negativně působí na minoritní nosiče náboje a to tak, že zkracuje dobu jejich života, výsledkem je snížení hodnot elektrických parametrů daného článku. Vyskytuje se jak u standardního monokrystalického křemíku, tak i u polykrystalického, jež je dotován fosforem. [7]

Vysoké teploty a dopadající záření, které obsahuje ultrafialovou složku, mohou způsobit degradaci použitých materiálů, zejména krycí fólie. Tato degradace se projevuje stárnutím, které způsobuje změnu barvy krycí fólie, jak je uvedeno na Obr. 2.2-2, nejprve dochází ke žloutnutí, poté až k zhnědnutí směrem od středu FV článku k jeho okraji. Krom teploty a ultrafialového záření má na změnu barvy vliv i vnitřní odpor článku a s ním spojené zahřívání článku. V reálných podmínkách jsou pak některé články zastíněny zbarvenou fólií, což vede k poklesu jejich výkonu. Aby se předešlo této degradaci, používá se při výrobě kvalitnějších panelů vysoko propustné tvrzené sklo a kvalitnější EVA fólie, která má UV záruku po dobu cca 4 let. [7]



Obr. 2.2-2 Degradace FV panelů dopadajícím zářením [25]

2.2.3 Delaminace FV panelu

Projevuje se oddělením jednotlivých vrstev FV panelu, zvláště pak EVA fólie od FV článků a tvrzeného skla, jak je zobrazeno na Obr. 2.2-3. Tato separace způsobí vznik dutin a bublin mezi jednotlivými vrstevami. Jedná se o závažnou poruchu a to zejména pokud nastane mezi článkem a rámem, čímž se poruší ochranná vrstva článku a může dojít k zaplnění dutiny vodou s chloridy a ta vlivem korozivních účinků poruší správnou funkčnost FV panelu a dojde k poklesu výkonu i účinnosti. [11]



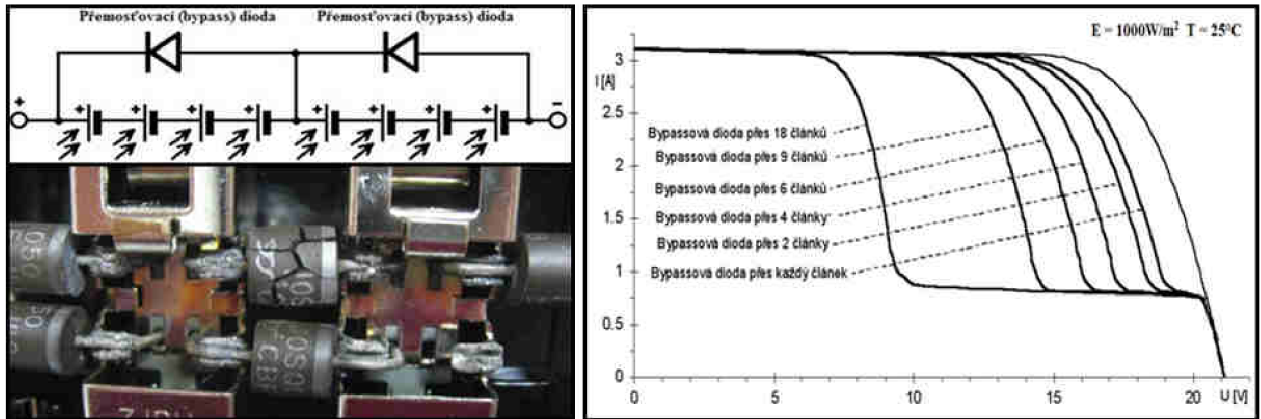
Obr. 2.2-3 Delaminace FV panelu [11]

2.2.4 Proražení/vyhoření bypassové diody

Použití polovodičových diod v FV systémech má velký význam, protože právě diody chrání jednotlivé články před zničením způsobeným značným zahříváním. Ve FV systémech se používají bypassové neboli překlenovací diody, jejichž úkolem je odpojit danou část panelu, resp. přejít do propustného směru, aby generovaný proud touto částí netekl v případě jejího zastínění a zabránit tak změně, kdy zastíněné články přestávají být zdrojem elektrické energie, ba naopak část energie vyrobené ostatními články spotřebovávají. Diody nejčastěji překlenují 18-24 článků a to nejen z důvodů proudových ztrát na diodě, ale chránění každého článku samostatnou diodou by bylo ekonomicky nákladné, avšak čím větší počet článků diody překlenují, tím větší pokles výkonu nastane při jejich působení, jak je zobrazuje Obr. 2.2-4 na následující straně. [11]

V případě, že je některý z FV článků zastíněn, vyrábí menší proud než články nezastíněné, z důvodu sériového zapojení článků, musí protékat všemi články stejný proud. Nezastíněné články vnutí zastíněnému článku větší proud a ten přechází do inverzního chodu, tj. místo generátoru se stává spotřebičem, dochází k výkonovým ztrátám, které způsobují jeho přehřívání, tím se snižuje životnost a může dojít až k trvalému poškození. Velikost ztrátového výkonu je úměrná míře zastínění. Zastínění jednoho článku z větší části je horší než zastínění několika článků z malé části. K omezení vlivu zastínění je velmi důležité použití bypassových diod, které jsou zapojeny antiparalelně do řetězců FV článků a umožňují průchod elektrického proudu většího, než je zkratový proud zastíněných článků, tyto diody přecházejí do propustného směru v okamžiku, kdy je napětí zastíněných článků rovno napětí nezastíněných článků a napětí diody.

Porucha bypassové diody nejen, že může ovlivnit výkon celého panelu, ale také jeho životnost, protože zastíněné články se značně zahřívají a může dojít k jejich poškození. Mezi nejčastější poruchy diod však naopak patří proražení, které je způsobeno nevhodným dimenzováním na zkratový proud, ten způsobuje nadměrné oteplení a následnou destrukci diody, která se permanentně vodivou. [11]



Obr. 2.2-4 Proražení bypassové diody a vliv aktivace na tvar V-A charakteristiky [19]

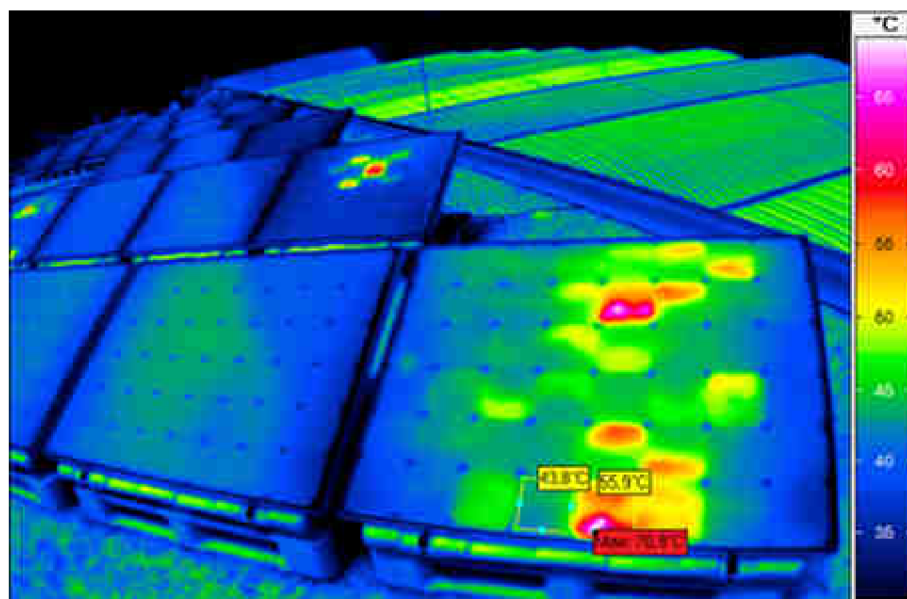
2.2.5 Horká místa (Hot Spots)

Jsou jedním z nejčastějších a nejzávažnějších typů poruch FV systémů, tyto horká místa vznikají, jak již bylo uvedeno v předchozím, částečným zastíněním dané oblasti, čímž se články v této oblasti může zahřát až k extrémním teplotám, které mohou vést k trvalému poškození nejenom článku, ale také k poškození ochranných prvků např. EVA fólie. [10]

Dalším důvodem pro vznik horkých míst může být vysoký kontaktní odpor na přípojnicích/sběrnících článku, což jsou vlastně stříbrné cesty spojující buňky. Příčinou takto vysokého odporu mohou být popraskané nebo rozteklé pájené spoje. [10]

Vznik horkých míst mohou způsobit také defekty krystalické mřížky FV článků, tyto místa, v nichž vzniká nadměrné množství tepla, nazýváme mikro/minicraks. [10][11]

Dle mnohaletých zkušeností lze konstatovat, že pokud je teplota daného článku o 50°C vyšší než teplota okolních článků, může dojít k trvalé destrukci FV článku a tím i celého panelu. Vznik horkých míst lze pozorovat nejenom vizuálně, kdy na zadní straně panelu vznikají hnědá místa, ale také pohmatem rukou nebo pomocí termovizní kamery, jak je uvedeno na Obr. 2.2-5, či elektroluminiscence (ELCD), pro zjištění přesných výsledků. I když je výkonová ztráta panelu z horkými články velmi nízká a horkých míst není moc, měli by být tyto panely vyměněny. [10][11]



Obr. 2.2-5 Horká místa zachycená termokamerou [13]

2.2.6 Šnečí cestičky (Snail trails)

Tento jev se projevuje u monokrystalických i polykrystalických panelů, vyznačuje se změnou zbarvení pod krycím sklem a laminární vrstvou FV panelů, které má tvar rovných či zakřivených linií o šířce cca 0,5 až 1 cm, jež mohou být nepravidelně větvené. Tyto linie resp. „cestičky“ jsou ohraničeny jednotlivými články, FV moduly však nejsou postiženy rovnoměrně a obvykle bývá zasaženo více článků v daném modulu, příklad projevu je uveden na Obr. 2.2-6 [12]

Šnečí cestičky se na panelech objevují až po několika měsíčním provozu, z čehož lze usuzovat, že jejich výskyt způsobuje kombinace chemických a fyzikálních změn, v závislosti na použité technologii či komponentech, což vychází z faktu, že se vyskytují pouze na některých značkách výrobců panelů. [12]

I když se principem vzniku tohoto jevu zabývají vědci, není však stále jednoznačný. Dle nejpokročilejších hypotéz vznikají tyto cestičky difúzí některých chemických částí EVA fólie přes mikrotrhlínky v článcích na jejich lícovou stranu, kde dochází k oxidaci stříbrných kontaktů, případně depozici polymerů z EVA fólie, jež vytvářejí změnu zbarvení. Dalším důvodem jejich vzniku může být chybná metalizace, při níž jsou stříbrné povlaky nahrazeny levnějšími materiály a též dochází k jejich oxidaci. Většina výrobců se shoduje, že se jedná jen o optickou vadu, která nemá vliv na výkon FV panelu. K tomu, že šnečí cestičky jsou pouze estetický problém, se přiklání i vědci, nicméně však poukazují na skutečnost, že mikrotrhlíny, které vznikají nejen při výrobě, ale i při dopravě či nesprávné manipulaci, mohou způsobovat snížení výkonu a v nejhorším případě i poškození panelu, proto po detekci výskytu šnečích cestiček je vhodné ověřit správnou funkčnost panelů. [12] [11]



Obr. 2.2-6 Snail trails nebo „šnečí cestičky“ [12]

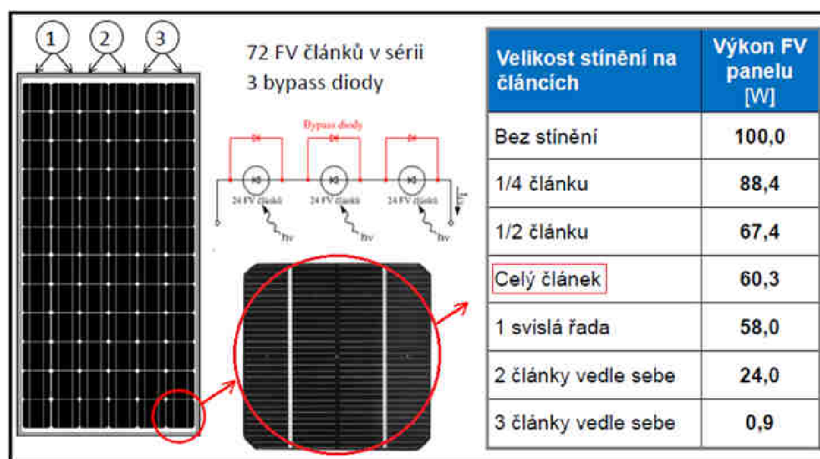
2.3 Negativní faktory ovlivňující chod FV systému

2.3.1 Zastínění

Jak již bylo uvedeno, největší vliv na výkon FV elektrárny má intenzita slunečního záření, která je u větších instalací nerovnoměrně rozložena, tudíž některá část může být osvětlena více než zbývající a generuje tudíž větší výkon. Rovnoměrné osvětlenosti celé aktivní plochy elektrárny není v běžné praxi reálně dosáhnout kvůli oblačnosti, znečištění panelů nebo zastínění. [11][18]

Právě zastínění má největší vliv na výkon elektrárny, pokud je některý článek zastíněn, změní se jeho polarita a namísto generátoru se stává spotřebičem, dochází k výkonovým ztrátám, což vede k jeho přehřívání, čímž se snižuje životnost a může dojít až k trvalému poškození. Proto je velmi důležité použití bypassových diod, které jsou zapojeny antiparalelně do řetězců FV článků. Vliv zastínění na výkon FV panelu je uveden na obrázku. [11]

Pokles výkonu FV modulu vlivem zastínění jeho článků je zobrazen na Obr. 2.4-1, vliv zastínění na tvar V-A charakteristik bude uveden v kapitole 5.1.2.



Obr. 2.3-1 Vliv zastínění na výkon FV panelu [18]

2.3.2 Vítr

Působení větru může způsobit poškození, v nejhorším případě i úplné zničení FV elektrárny, proto je při návrhu kladen velký důraz na pevnost a odolnost nosných konstrukcí, zejména jejich správné ukotvení. Nevhodně ukotvená a následně zničená FV elektrárna je na Obr. 2.3-2. [18]



Obr. 2.3-2 FV elektrárna poškozená účinky větru [18]

2.3.3 Sníh

Nejenže sněhová pokrývka způsobuje zastínění panelů, ale také váha nahromaděného sněhu může způsobit poškození panelů. Pokud sníh nemá kam odtávat, hromadí se u paty panelu a svojí vahou může způsobit prolomení panelu, jak je patrné z Obr. 2.3-3. Proto je při návrhu a instalaci nutné dbát na vhodné podepření, konstrukci a sklon FV panelu. [18]



Obr. 2.3-3 Promáčknutý FV panel a ohnutý rám [18]

2.3.4 Poruchy kabeláže

Nejčastější vadou na stejnosměrné straně systému je špatné dimenzování průřezu kabeláže vzhledem k její délce, což vede k výkonovým ztrátám a nadměrnému zahřívání. Dalším problémem bývá nevhodné uložení či přichycení kabelů na konstrukci panelů, které může způsobit, že se u volně visících kabelů rozpojí konektor, popř. dojde k jeho vytržení při nevhodné manipulaci nebo může být překousán zvířaty. Důležitá je odolnost všech komponent elektrického vedení vůči povětrnostním vlivům a UV záření, neboť při nedostatečné odolnosti dojde působením těchto vlivů k jejich zničení. [11]

Podobně jako u stejnosměrné kabeláže musíme u střídavé dbát na správné dimenzování průřezu vzhledem k přenášeným výkonům a délce vedení. Nejenom že na poddimenzovaném vedení dochází k výkonovým ztrátám a nežádoucímu ohřevu, ale také na něm vzniká značný úbytek napětí.

Pokud jsou v systému použity akumulátory, musí být připojeny vhodně dimenzovanými vodiči, protože nabíjecí proudy mohou dosahovat značných hodnot.

2.3.5 Nevhodné jištění a spínací prvky

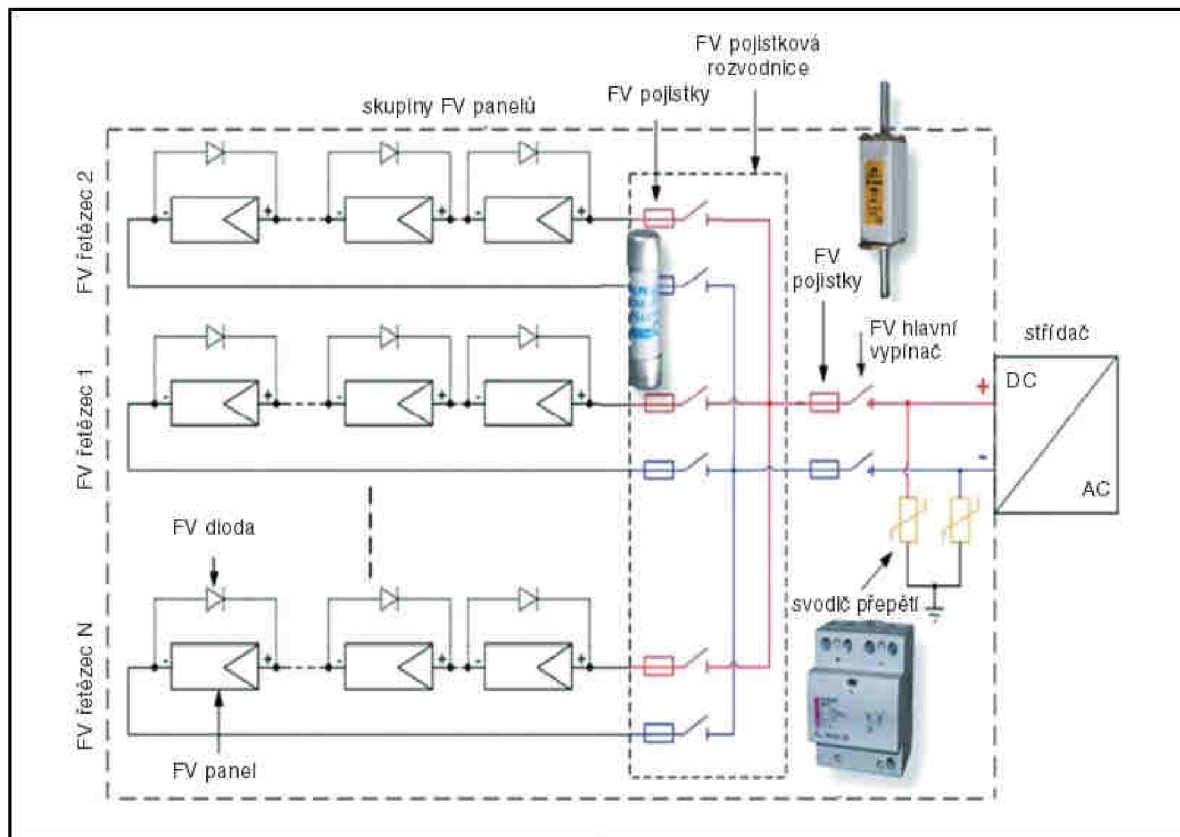
Nutnost jištění na DC straně závisí na počtu řetězců neboli stringů, které jsou paralelně řazeny ke vstupu střídače. [11]

Jestliže má systém pouze jeden string není nutné jej jakkoliv jistit, protože neexistuje žádný vnější zdroj proudu, který by mohl poškodit FV panely či kabeláž v daném stringu. [11]

Jištění není zapotřebí, i když má FV systém dva stringy, protože uvažujeme, že každý string může generovat $1,25 I_{sc}$ a tudíž pokud nastane porucha jednoho stringu (např. zemní spojení) generovaný proud druhého stringu teče přes poškozený string, ten je však dimenzován na proud $1,56 I_{sc}$ a proto nedojde k jeho poškození. [11]

Pokud však systém obsahuje tři a více stringů, tak při poruše jednoho stringu jím protéká $1,25 I_{sc}$ z každého nepoškozeného stringu a tudíž výsledný proud přesahuje $1,56 I_{sc}$ a mohlo by dojít k poškození FV panelu, případně kabeláže, proto do každého stringu musí být zařazena pojistka případně jistič o minimální hodnotě $1,56 I_{sc}$. Způsob jištění FVE se třemi a více stringy je uveden na Obr. 2.3-4. [11]

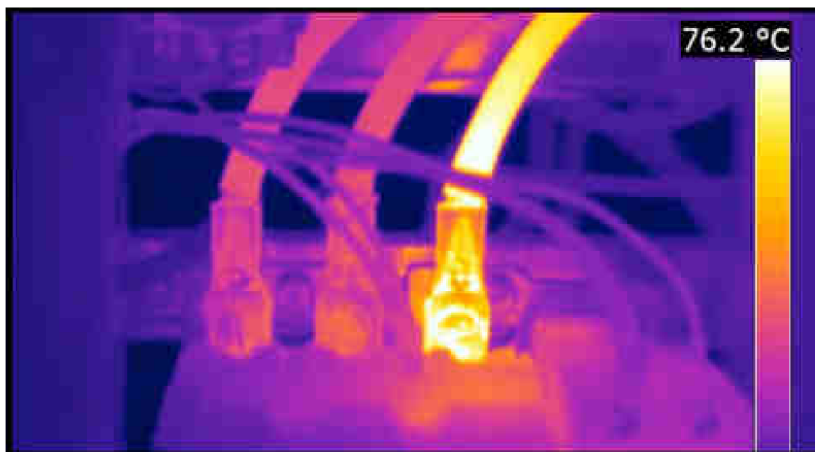
Na špatně dimenzovaném jisticím prvku může dojít ke vzniku elektrického oblouky, který může vést až ke vzniku požáru, stejně tak je tomu i u spínacích prvků, které musí umožnit vypnutí dané části systému bez vzniku oblouku a musí být navrženy tak, aby snesly bez poškození maximální provozní proudy. [11]



Obr. 2.3-4 Způsob jištění FVE se třemi a více stringy [11]

2.3.6 Přechodový odpor

Patří mezi časté problémy nejenom FV systémů, u nekvalitně provedených spojů, např. špatně dotažených šroubových spojení, dochází vlivem přechodového odporu k nárůstu teploty, která může překročit kritickou hodnotu, Obr. 2.3-5, a tím způsobit poškození daného spoje, což může vést výpadku systému případně až ke vzniku požáru.



Obr. 2.3-5 Špatný kontakt způsobující nežádoucí ohřev [23]

2.3.7 Přídavné ztráty na AC a DC straně

Ztráty na DC straně jsou složeny ze ztrát na vedení, kontaktních ztrát a ztrát na sériových komponentech mezi FV moduly a měničem.

Ztráty na AC straně jsou složeny ze ztrát na vedení, kontaktních ztrát a ztrát na sériových komponentech a zařízeních mezi měničem a připojovacím bodem elektrické sítě

Většinou jsou způsobeny špatným dimenzováním či volbou typu jednotlivých komponent, jejich stárnutím nebo mechanickým poškozením.

2.3.8 Nevhodný návrh rozváděče

Zde se klade hlavní důraz na dostatečný odvod tepla z rozváděče, vznikajícího provozem zařízení v něm umístěných a kvalitní provedení spojů. Pokud jsou zařízení v rozváděči nevhodně rozmístěna a není zajištěn dostatečný odvod tepla, dochází k přehřívání všech zařízení navzájem, což může vést k vybavení tepelných ochran, případně poškození zařízení. Rozváděč však musí mít dle místa instalace požadované krytí.

2.3.9 Nevhodně zvolený či dimenzovaný střídač

Špatná volba střídače nejen, že způsobuje snížení efektivity a výtěžnosti celé FV elektrárny, ale také může mít negativní vliv na připojenou síť v případě „on-grid“ systémů a v nejhorším případě může dojít k jeho poškození a tím výpadku celé výroby. Požadavky na měniče napětí, které pracují do distribuční sítě, byly definovány v kapitole 2.4.1.. Mezi obecné požadavky, které musí navrhnutý střídač splňovat, patří vhodný rozsah napětí MPP trackeru a rozsah jeho účinnosti, vysoká celková účinnost měniče, vhodná vnitřní konfigurace, dostatečné dimenzování výkonu, přičemž vstupní výkon $P_{DC} = 1 \div 1,15 P_{ACmax}$ (maximální výkon AC strany) a také $P_{DC} > P_{FV\Sigma}$ (celkový instalovaný výkon FV panelů), dále vstupní proud $I_{DC INV max} > I_{SC}$ a vstupní napětí $U_{DC INV max} > U_{0C (-15^{\circ}C)}$. [3]

2.3.10 Nevhodná kombinace panelů a nesymetrické stringy

Tato chyba vzniká nejen při návrhu FVE, ale také při nedbalé montáži. Výskyt různých FV panelů, ač stejného výkonu, v jednom ze stringů způsobuje pokles výkonu daného stringu za různých podmínek. Pokud jsou ve stringu rozdílné moduly, pak celkový proud tekoucí stringem je limitován nejslabším panelem a celkové napětí ve stringu je definováno součtem jejich pracovních napětí. Tento jev je nazýván „mismatch FV panelů“. Dalším problémem jsou nesymetrické stringy, které způsobují nesymetrické zatížení vedení, střídače či střídačů a mohou způsobovat nesymetrii v rozvodné síti, do níž je FVE připojena. [11]

2.3.11 Nevhodný sklon a orientace panelů

Pro správné fungování FV elektrárny a pro efektivní využití instalovaného výkonu je důležitý sklon a orientace panelů. Maximální výtěžnosti systému lze dosáhnout orientací panelů k jihu, ani odklon do 20 stupňů směrem na jihozápad či jihovýchod nezpůsobí výrazný pokles výroby cca do 5%, výraznější pokles výroby se projeví při orientaci na východ či západ, kdy může dosahovat až 25 %. [3]

Pro nejefektivnější využití dopadajícího záření by měly sluneční paprsky dopadat kolmo na FV panel, což však nelze zajistit u pevně instalovaných panelů vzhledem k pohybu slunce po obloze, proto se ideální sklon pevně instalovaných panelů odvíjí od zeměpisného umístění výroby, v okolí Brna se pohybuje kolem 33°, jedná se o kompromis mezi výtěžností elektrárny v zimním a letním období, tzn. kdy je slunce nízko nebo naopak vysoko nad horizontem. Mírně odlišný sklon panelů od ideálního způsobuje pouze minimální pokles energetické výtěžnosti. Dle mnohaletých zkušeností lze konstatovat, že pokles výkonu elektrárny nepřekročí 10% při instalaci panelů v rozmezí 10-60° v našich zeměpisných šířkách. Pokles výkonu však bude výraznější při instalaci FV panelů na fasádu, tj. svisle, kdy může dosahovat 25 až 30%, avšak při optimalizaci pro zimní podmínky je téměř svislé umístění optimální. [3]

Výše uvedené parametry platí pro mono- a polykrystalické panely, protože amorfní panely nejsou tak citlivé na potřebu přímého slunečního záření, ale mají obecně nižší účinnost.

Sklon a umístění panelů nelze ve všech případech volit libovolně, záleží zejména na dispozicích daného objektu, a proto se většinou volí vhodné kompromisy.

Se sklonem panelů úzce souvisí vhodné rozestupy jednotlivých řad panelů a to při instalacích na ploché střeše a volném prostranství. Tyto rozestupy jsou obvykle určovány pro případ, kdy je slunce nejnižší nad obzorem a sluneční paprsky dopadají na zemský povrch pod úhlem $\alpha = 17^\circ$. [3]

3 EFEKTIVITA PROVOZU FVE- TEORIE VS. PRAXE

Tato část práce se zabývá možnostmi zvýšení efektivnosti výroby elektrické energie z FVE. Budou zde rozebrány jednotlivé možnosti zvýšení efektivnosti provozu, jak po stránce technického návrhu, tak i optimalizace již zbudovaných FVE a také porovnání s reálnými skutečnostmi a ekonomickými faktory. [36]

3.1 Návrh FVE

Předpoklad vysoké efektivnosti začíná již u samotného návrhu, základním vzorcem pro výpočet účinnosti systému je:

$$\eta_{celk} = \eta_{panelů} * \eta_{vedení} * \eta_{střídačů} * \eta_{trafa} \quad (7)$$

Pro vlastní návrhy systému se používá velké množství programů, jedná se buďto o produkci výrobců střídačů nebo o vlastní software velkých společností. Pro správný výpočet je zapotřebí přesné vstupní parametry, kterými jsou nejenom celková plocha elektrárny, ale také její zeměpisné souřadnice, meteorologická data a další. Jelikož je výkon panelů závislý nejenom na dopadajícím slunečním záření, ale i na teplotě, je kladen důraz na vhodné dimenzování celého systému, zejména na průřez vodičů, protože v zimních měsících teplota kolísá pod bod mrazu, což způsobuje, že proud vyráběný panely může vzrůst nad hodnotu udávanou výrobcem. [36]

S výše uvedeným souvisí i počet a výkon střídačů, lze zvolit ze dvou základních uspořádání:

V prvním případě lze zvolit jeden či dva centrální střídače spolu s trafostanicí s čímž souvisí hlavní výhoda ve vysoké účinnosti přeměny energie, která může dosahovat až 98%. Krom účinnosti je dalším důležitým parametrem rozsah vstupního napětí, tj. napětí, od kterého je střídač schopen dodávat do sítě energii, a také další parametry, které již byli uvedeny v předchozí kapitole. S použitím centrálního střídače úzce souvisí vhodné nastavení servisních podmínek s dodavatelem technologie, protože sebemenší výpadek a porucha může na výstupu způsobit velké ekonomické ztráty. Vhodné umístění centrálního střídače je ve středu elektrárny, tak aby všechny vodiče vedoucí od panelů byli stejně dlouhé a nedocházelo vlivem ztrát na vedení k nežádoucím odchylkám. [36]

V druhém případě lze použít menší decentralizované střídače, které se instalují přímo na konstrukci s panely, jejich počet a výkon je určen návrhovým softwarem. Opět je zapotřebí zohlednit teploty, které se mohou vyskytovat v zimním období. Instalované střídače by neměly být provozovány na maximálním výkonu, pro nejlepší funkci střídače je vhodné na jeho vstup přivést 80-85% maximální hodnoty napětí, kterou je schopen zpracovat. Většina kvalitních střídačů je vybavena MPP trackerem, který nastavuje pracovní bod střídače do optimální polohy. I v případě decentralizovaných střídačů je velmi důležité mít nastaveny servisní podmínky umožňující opravu formou výměny, případně je vhodné mít v záloze jeden střídač skladem, čímž lze zajistit vysokou efektivnost provozu FVE a její bezporuchový stav. [36]

Více pozornosti je vhodné věnovat počtu panelů na střídač, protože při jasném počasí v zimních měsících se může na vodičích do střídače objevit vyšší proud, než který je udáván výrobcem panelů. Krátkodobé přetížení je střídač schopen zvládnout, pokud se však opakuje pravidelně, dochází k rapidnímu snižování životnosti střídače. Výhodné je použití „chytrých“ střídačů, které jsou připojeny na komunikační okruh a v pravidelných intervalech podávají hlášení o stavu systému a v případě poruchy je možné ji rychle odhalit a lokalizovat. [36]

3.2 Provoz FVE

Základním prvkem pro zajištění bezchybného provozu je vhodný monitorovací systém, který kromě přehledu o vyrobené elektrické energii umožňuje sledovat odchylky. Monitorovací systém vybavený senzory slunečního záření, teploty panelů a teploty vzduchu je schopen předpovídat, s dostatečnou tolerancí, očekávané množství vyrobené elektrické energie za definované období a každá větší odchylka by měla být impulzem k provedení kontroly systému, protože každý den, v němž systém vykazuje odchylku od předpokladu, znamená velké ekonomické ztráty. Nej kvalitnější monitorovací systémy dovedou také hlídat stav elektrických ochranných vyzvedčů a podávat pravidelné zprávy díky vzdálenému připojení. [36]

Aby byla zajištěna nejvyšší účinnost provozu, doporučuje se provádět pravidelné kontroly FVE i v bezporuchovém stavu, optimální je provést každý měsíc vizuální kontrolu systému a odečíst hodnoty z elektroměru. V případě opakovaných odchylek vyrobené energie mezi jednotlivými střídači, případně vůči předpokladu či při vizuálním zjištění možné závady je zapotřebí použít pokročilejší diagnostické metody. Čím dříve dojde k odhalení závady a k jejímu odstranění, tím menší budou celkové ztráty. Nemalý vliv na výkonnost systému má také čistota aktivní plochy FV panelů, která je ve většině případů často podceňována. Protože, každé znečištění způsobuje v jisté míře zastínění FV článků a tím snižuje účinnost přeměny slunečního záření na elektrickou energii a může způsobovat nadměrný ohřev článků. [36]

3.3 Praktické poznatky z provozu FVE

Velké množství investorů i soukromníků má mylnou představu o jednoduchosti a nenáročnosti provozu fotovoltaické elektrárny, avšak z výše uvedených faktů je zřejmé, že tomu tak není. Vždy je zapotřebí dodržet zmíněná doporučení a zásady, i přes to je spousta provozovatelů zanedbává a to nejspíše z ekonomických důvodů (pořizovací náklady), o to jsou pak větší následky a ztráty, většinou ekonomické. [36]

Základní pravidla pro bezporuchový provoz lze shrnout do následujících bodů:

- Kvalitní monitorovací systém s možností měření odchylek
- Pravidelná kontrola fotovoltaického systému, v ideálním případě každý měsíc
- Neignorování opakujících se odchylek a výpadků [36]

V případě decentralizovaných střídačů je vhodné mít v zásobě jeden náhradní střídač, také několik fotovoltaických panelů a samozřejmě pojistek, které jsou nedílnou součástí každého rozváděče. Lze to však vyřešit i dodavatelskými službami a servisními službami s reakcí do 24h, kterých již dnes na trhu existuje celá řada. [36]

3.4 Shrnutí poznatků

Nejenom návrh, ale i provozování fotovoltaických elektráren vyžaduje pečlivý přístup, jedině tímto způsobem lze dosáhnout maximální efektivity využití dopadajícího slunečního záření a zajistit vyšší procento bezporuchového provozu. V případě častých poruch by měla být provedena pečlivá kontrola, protože kromě vzniku různých defektů může být závada ve špatném dimenzování střídačů, elektrických ochranných vyzvedčů nebo vedení. V případě nekvalitní technologie je jediným řešením lokalizace vadných prvků a jejich následná výměna. Dle uvedeného není provoz FVE krátkodobou záležitostí a pro zajištění bezporuchového a efektivního provozu je zapotřebí aktivního přístupu a okamžitého řešení závad. [36]

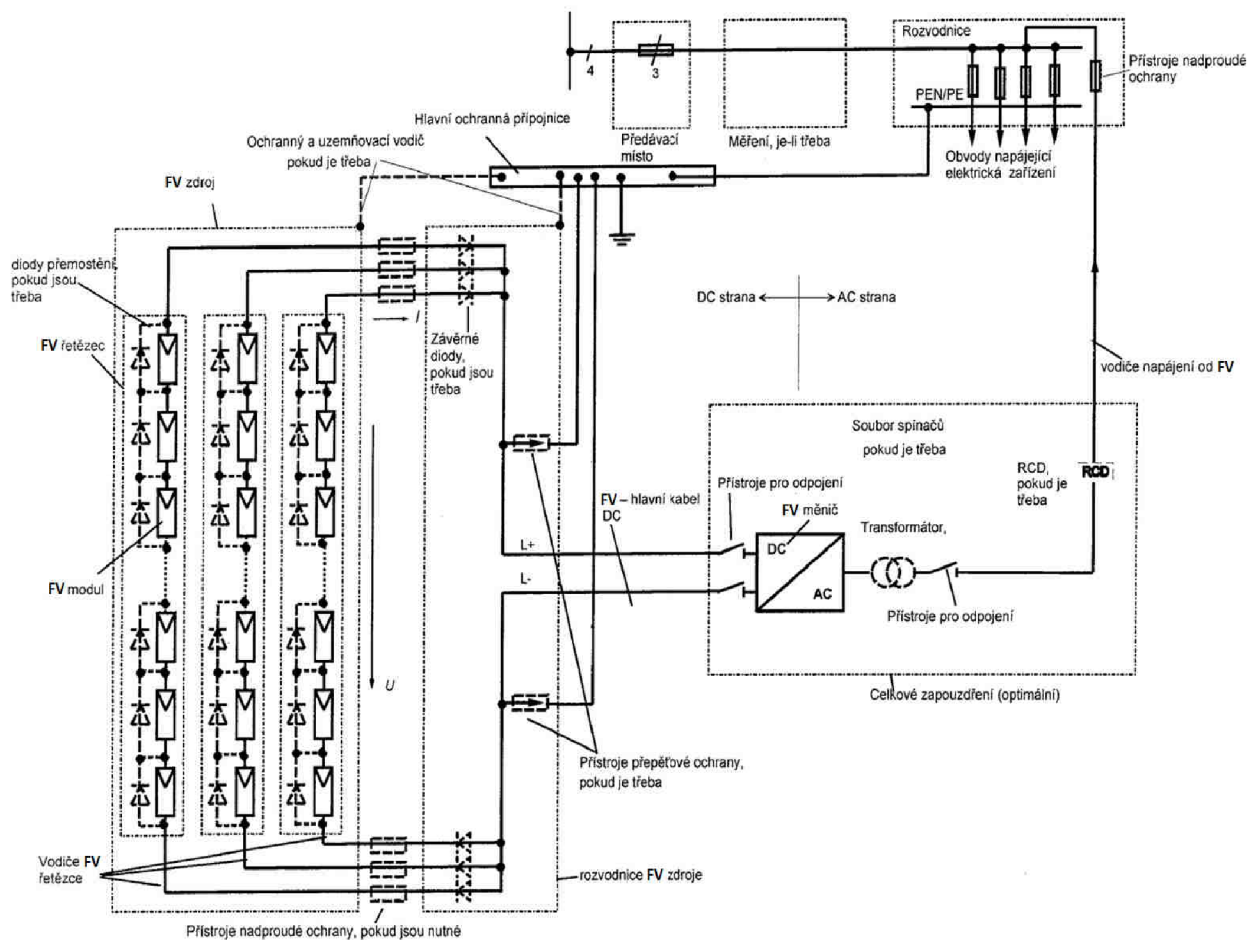
4 METODIKA KONTROLY A DIAGNOSTIKY FVE

Větší část kontrolních postupů a zkoušek FV systému připojeného na síť by měla být provedena s odkazem na normu ČSN 332000-6, která definuje požadavky pro prvotní a následné periodické zkoušky/kontroly jakýchkoliv elektrických zařízení.

První zkouška či kontrola se provádí po dokončení nové instalace nebo po dokončení rekonstrukce či změn stávající instalace před uvedením do provozu. Veškeré zkoušky a kontroly musí být prováděny kvalifikovanou osobou.

Pravidelné zkoušky/kontroly slouží k ověření, zda je instalace a všechny její části v uspokojivém stavu pro další použití.

Při kontrole a testování musí být FV zařízení na DC straně považováno za elektricky činné vždy, i v případě, že je odpojeno od AC strany.



Obr. 3.4-1 Obecné schéma FV systému s jedním FV polem [39]

4.1 Kontrola FVE

4.1.1 Požadavky na systémovou dokumentaci

V této části, vycházející z technické normy ČSN EN 62446, bude uveden minimální obsah dokumentace, která by měla být poskytována po instalaci FV systému. V této dokumentaci by měla být uvedena klíčová data dostupná pro zákazníka, inspektora či údržbáře. Dokumentace také zahrnuje základní systémová data a informace potřebné pro obsluhu a údržbu. [39]

Mezi minimální informace, které by měli být uvedeny na titulní straně systémové dokumentace, patří:

- Identifikace projektu
- Jmenovitý výkon systému (kW DC nebo kVA AC)
- FV panely a střídače- výrobce, model a množství
- Datum instalace systému
- Datum uvedení do provozu
- Jméno zákazníka
- Adresa a umístění FVE [39]

Informace o projektantovy systému a stavební (montážní) společnosti

Mezi minimální informace pro všechny orgány odpovědné za návrh a výstavbu systému, patří:

- Název projekční a stavební (montážní) společnosti
- Kontaktní osoba dané společnosti
- Poštovní adresa, telefonní číslo a emailová adresa

Pokud se na návrhu či výstavbě systému podílí více než jedna společnost, měli by zde být uvedeny informace o všech podílejících se společnostech vč. popisu jejich úlohy. [39]

Schéma zapojení

Jako minimum musí být uvedeny následující podrobné informace:

Specifikace FV pole a stringů

- Typ a celkový počet FV modulů
- Počet stringů
- Počet modulů ve stringu
- Průřez a typ kabelů
- Popis a umístění rozvodnic (v případě potřeby)
- Umístění, typ a popis nadproudových ochran (v příp. potřeby)
- Typ blokovací diody (pokud jsou použity nebo je to důležité) [39]
- Popis DC odpojovače, tj. umístění a typ (napětí/proud)

Uzemnění a ochrana proti přepětí

- Podrobnosti o všech zemnicích, tj. velikost a místo připojení
- Informace o prvcích pro vyrovnání potenciálu
- Podrobnosti o připojení na již existující systém ochrany proti blesku (LPS)
- Umístění, typ a popis přepětiových ochran (jak na DC, tak i AC straně)

AC strana systému

- Umístění, typ a napěťové/proudové informace o AC odpojovači, o nadproudové ochraně AC strany a proudovém chrániče (pokud je použit)

Přístrojová dokumentace (datasheet) a mechanické konstrukční informace

- Modulová dokumentace pro všechny typy modulů použitých v systému
- Invertorová dokumentace pro všechny typy invertorů použitých v systému
- Dokumentace pro další důležité komponenty systému
- Dokumentace týkající se výstavby systému, vč. popisu konstrukčních prvků systému

Provozní a údržbářské informace

- Postupy pro ověření správné funkce systému
- Návod jak postupovat v případě selhání systému
- Nouzové vypnutí a izolační postupy
- Doporučení pro údržbu a čištění (pokud je to nutné) [39]

4.1.2 Kontrola DC části systému

Zkontrolujte:

- Zda jsou všechny komponenty navrženy a instalovány v souladu s ČSN 332000 obecně a zvláště s ČSN 332000-7-712, z čehož vychází následující průběh kontroly
- Zda jsou všechny DC komponenty určeny pro stejnosměrný provoz, při maximálním možném systémovém napětí a při maximálním možném poruchovém proud systému
- Zda jsou v systému na DC straně použita zařízení třídy ochrany II nebo s rovnocennou izolací, ochrana nevodivým okolím či neuzemněným místním pospojováním se nedovoluje
- Kabely FV stringů, FV pole a hlavní kabely DC strany jsou navrženy a nainstalovány tak, aby se minimalizovalo riziko zemních poruch a zkratu. Typicky se používají kabely se zesílenou izolací (s tzv. „dvojitou izolací“)
- Elektrická vedení jsou navržena a instalována tak, aby odolala očekávaným vnějším vlivům, mezi které patří vítr, déšť, tvorba námrazy, vliv teploty a slunečního záření
- Provedení konektorů a spojů je kvalitní, pevné, nízko-odporové a správně dimenzované
- Stringové kabely jsou dimenzovány tak, aby odolaly maximálnímu kombinovanému poruchovému proudu v případě paralelních stringů
- Zda jsou tyto nadproudové ochrany správně zvoleny a namontovány dle místních předpisů a pokynů výrobce pro instalaci ochrany FV panelů, většinou se jedná o pojistky dimenzované na $1,25 \times I_{SC\text{STC}}$ daného stringu.
- Zda je na DC straně invertoru umístěn DC odpínač, umožňující bezpečné odpojení od měniče
- V případě použití závěrných diod, připojený do série FV řetězců, zda je jejich zpětné napětí nejméně $2 \times V_{OC\text{stc}}$ FV řetězce v němž jsou použity
- Zda je AC a DC strana alespoň jednoduše oddělena, a uzemnění je odolné vůči korozi, je-li jeden živých vodičů na DC straně uzemněný
- Zda ochranná uzemnění rámu FV pole, rámu FV modulů či nosných konstrukcí jsou správně nainstalovány a propojeny se zemí (vyžadují-li to místní předpisy) [39][35]

4.1.3 Kontrola AC strany systému

- Kontrola způsobu izolace měniče na AC straně
- Kontrola, zda je FV napájecí vodič na AC straně připojen k napájené straně přes přístroje zajišťující samočinné odpojení napájených zařízení od obvodů zajišťujících napájení, v případě přetížení a zkratu
- Zkontrolujte, zda všechny vodiče, izolace, spínací zařízení a další prvky byly spojeny tak, že FV instalace je účinně připojena k zátěži a k distribuční síti elektrické sítě
- Zkontrolujte provozní parametry měniče, které byly nastaveny dle místních předpisů
- V případě, že FV střídač nemá ani jednoduše oddělenou AC a DC stranu, zkontrolujte, zda je systém vybaven proudovým chráničem typu B [39][35]

4.1.4 Kontrola označení a identifikace

- Vhodné značení všech obvodů, ochranných zařízení, spínačů a terminálů
- Všechny DC rozvodnice musí být označeny štítkem, upozorňujícím, že aktivní části uvnitř boxů jsou napájeny z FV pole a mohou být elektricky živé i po provedení izolace od střídače
- Zřetelné označení hlavního AC odpojovače
- V případě duální dodávky musí být místa propojení zřetelně označena
- V místě elektrárny musí být uvedeno schéma zapojení, detaily instalace, nastavení ochrany střídače a nesmí chybět ani nouzové postupy pro vypnutí
- Všechny značky a štítky musí být vhodně připevněny a musí být odolné klimatickým vlivům

4.1.5 Vizuální kontrola

Její účelem je odhalit případné vzhledové vady FV modulu, uvolněné či poškozené spoje, poškozené vodiče a další.

Při vizuální kontrole je zapotřebí pečlivě zkontrolovat každý modul, kabelová vedení, nosné konstrukce a další prvky FVE.

Mezi nejčastěji odhalitelné defekty patří:

- Zlomené, prasklé nebo jakýmkoliv způsobem poškozené části modulu, vč. rámu a svorkovnic
- Ohnuté nebo zkřivené vnější části, rámy, kryty, které by způsobovaly zhoršení provozních vlastností
- Trhliny, zlomy a jiné poškození jednotlivých FV článků, které způsobují, že více než 10% článku je nefunkční
- Bubliny nebo delaminace, které spojují část elektrického obvodu s okrajem panelu
- Vadné či špatně dotažené spoje na samotném modulu, na kabelových vedeních a v jednotlivých rozvodnicích
- Vadné konektory, vodiče nebo jiné elektricky vodivé prvky
- Poškozené nosné konstrukce, výrazné znečištění FV panelů a jakékoliv jiné závady ovlivňující bezchybný provoz

V případě zjištění některé z uvedených závad je zapotřebí zaznamenat, protože mohou negativně ovlivnit chování FV systému v následujících testech. [39]

4.2 Diagnostika a testování FVE

Měřicí přístroje a monitorovací zařízení musí být voleny v souladu s ČSN EN 61557. Zkušební metody uvedené níže jsou považovány za referenční, avšak použití jiných metod není vyloučeno v případě, že poskytují neméně platné výsledky. [39]

4.2.1 Kontinuita ochranného zemnění či vyrovnání potenciálu

Tam, kde jsou ochranné a spojovací vodiče instalovány na straně stejnosměrného napětí, např. propojení rámu panelů/polí, se test elektrické kontinuity provádí u všech vodičů. Ověřeno by mělo být také připojení k hlavnímu zemniči. Zemnicí odpor uzemňovacích elektrod (zemničů) je třeba měřit vhodným přístrojem pro měření odporu uzemnění. V případě že existuje více paralelních zemničů, je výhodná dvou svorková metoda, přičemž typická limitní rezistence zemnění je maximálně 10 Ω . [39][35]

4.2.2 Test polarity

Pomocí vhodného zařízení se kontroluje polarita všech DC kabelů. Jakmile je polarita kabelů ověřena, je zapotřebí zkontrolovat, zda jsou kabely správně označeny a připojeny do systémových zařízení (spínače, invertory atd.). Z bezpečnostních důvodů a pro prevenci poškození připojených zařízení, je nemírně důležité, aby byla kontrola polarity provedena před ostatními testy a před sepnutím spínačů nebo před vložením nadproudových ochranných stringů.

Pokud se kontrola provádí na již připojeném systému a zjistí se přepólování některého stringu, je důležité zkontrolovat moduly a bypassové diody pro nalezení jakékoliv příčiny této chyby. [39]

4.2.3 Měření aktuálního napětí a proudu- provozní zkouška

Tento test slouží pro měření momentálního napětí a proudu na výstupu z FV panelu/stringu/pole. Výstupní proud a napětí závisí na podmínkách prostředí a na tom jak měnič nastavuje pracovní bod. MPP tracker měniče upravuje napětí a proud pro získání maximálního dostupného výkonu z připojeného FV generátoru. [39][35]

Pokud existuje více stejných stringů, měly by být naměřené výsledky mezi sebou porovnány. Dle ČSN EN 62446 by měl být rozdíl výsledků mezi jednotlivými řetězci menší než 5%. Je-li rozdíl v tomto rozmezí, je velmi pravděpodobné, že nejsou žádné vážné problémy s výkonem FV instalace. [39][35]

4.2.4 Měření napětí naprázdno a proudu nakrátko FV zařízení

Měření napětí naprázdno U_{OC}

Jak již bylo řečeno v úvodu, napětí naprázdno je výstupní napětí FV modulu/stringu/pole bez zatížení ($I=0A$), jehož měření je spolu s měřením I_{sc} považováno dle ČSN EN 62446 za kontrolu správné funkce FV zařízení a mělo by být provedeno vhodným měřicím přístrojem a to před sepnutím spínačů či instalací stringových nadproudových ochranných. [39][35]

Změření menší hodnoty napětí než je očekáváno může být způsobeno připojením jednoho či více modulů se špatnou polaritou, poruchou v důsledku špatné izolace, prosáknutím vody do modulu, vedení či spojovací krabice nebo také jinou poruchou. [39]

Vyšší napětí je obvykle důsledkem chybného zapojení. [39]

Měření proudu nakrátko I_{sc}

Proud nakrátko je výstupní proud FV modulu/stringu/pole v případě, že výstup je zkratován ($U=0V$). Měření I_{sc} mělo být provedeno vhodným měřicím přístrojem, všechny stringy musí být od sebe navzájem izolovány, a také všechny spínače a odpojovače musí být rozepnuté. Při měření je do stringu zaveden dočasný zkrat. [39][35]

Vyhodnocení

U systémů složených z více stejných stringů, pro které jsou při měření stejné a stabilní podmínky ozáření, je možné naměřená napětí a proudy mezi sebou porovnat, naměřené hodnoty by měly být shodné v rozmezí $\pm 5\%$. Pokud podmínky ozáření nejsou stejné a jsou-li k dispozici údaje o klimatických podmínkách během měření a modulová data, mohou být výsledky přepočítány na STC. Naměřené hodnoty přepočtené na STC pak mohou být porovnány s nominálními hodnotami. Pro stringy složené ze stejných FV modulů mohou být nominální hodnoty stringu vypočteny dle níže uvedených rovnic. [39][35]

$$U_{oc_{nom}}(string, pole) = U_{oc_{nom}}(modul) * n \quad (7)$$

$$I_{sc_{nom}}(pole) = I_{sc_{nom}}(modul) * n \quad (8)$$

, kde

n počet sériových modulů ve stringu

m počet paralelních stringů v poli [39][35]

Pokud nominální (udávané výrobcem) a STC (měření a výpočet) hodnoty jsou podobné a rozdíly mezi výsledky pro jednotlivé stringy jsou v rozsahu $\pm 5\%$, je pravděpodobné, že nejsou žádné vážné problémy ve FV systému. Pomocí měření U_{oc} a I_{sc} však nelze potvrdit, že FV generátor produkuje požadovaný výkon. Pro kompletnější ověření nebo v případě, že hodnoty STC nejsou podobné nominálním, měla by být provedena další analýza na bázi měření V-A křivek. [39][35]

4.2.5 Měření izolačního odporu FV zařízení

Účelem tohoto testu je ověření, zda je izolace modulu/stringu/pole v pořádku, tj. izolace mezi elektricky živými částmi a rámy modulů a izolace mezi elektricky živými částmi a okolním prostředím. Mezi potřebná zařízení patří zdroj stejnosměrného napětí s proudovým omezením, který je schopný dodat napětí od 250V do 1000V, případně dvojnásobek provozního napětí modulu/stringu/pole a také vhodný měřicí přístroj pro měření izolačního odporu. [39][35]

Testovací metoda

Zkouška by měla být prováděna pro každé FV pole, ale je možné testovat i jednotlivé řetězce či moduly. [39]

Před započítím testu izolujte FV generátory od střídače (obvykle pomocí odpínače) a odpojte veškeré prvky systému, které by mohly mít vliv na měření izolace (např. přepěťové ochrany). Při měření používejte zkušební napětí uvedené v příložené tabulce 4.2-1 [39]

Testovací metoda č.1- Izolační test mezi záporným pólem zařízení a zemí s následným testem mezi kladným pólem a zemí. [39]

Testovací metoda č.2- Izolační test mezi zemí a zkratovaným kladným a záporným pólem zařízení. Aby se předešlo vzniku oblouku, musí být oba póly zkratovány vhodným a bezpečným způsobem, obvykle pomocí zkratovacího pouzdra, které obsahuje DC spínač pro bezpečné rozpojení zkratu. [39]

V případě, že konstrukce či rámy jsou spojené se zemí a toto spojení je kontinuální a dobře vodivé, může být využito jako pro připojení zemního kontaktu. [39]

V případě, že rámy panelů nejsou spojeny se zemí (např. v instalacích třídy II) provede se test buďto mezi kabeláží FV pole a zemí nebo mezi kabeláží a rámem. [39]

Pokud FV pole nemá vodivé části (např. PV střešní krytina) musí být test proveden mezi kabelem a zemněním dané budovy. [39]

Po ukončení měření je izolační odpor změřený při daném zkušebním napětí vyhovující, pokud jeho hodnota není menší než hodnota $40 \text{ M}\Omega \cdot \text{m}^2$, tato hodnota je vztažená k celkové ploše FV modulů. [39][35]

Testovací metoda	Systémové napětí ($V_{OCstc} \times 1,25$) [V]	Zkušební napětí [V]
Testovací metoda 1	<120	250
	120-500	500
	>500	1000
Testovací metoda 2	<120	250
	120-500	500
	>500	1000

Tab. 4.2-1 Velikost zkušebního napětí [39]

4.2.6 Měření AC strany

Níže uvedené testy se provádějí zejména při uvádění FVE do provozu, při pravidelné revizi zařízení nebo v případě, že z nějakého důvodu vznikly pochybnosti o správné funkci daného prvku.

Testování nadproudové ochrany

Funkce pojistek mezi AC stranou střídače a připojovacím bodem k napájecímu systému je stejná jako u jiných pojistek pro střídavé obvody. Mělo by být provedeno ověřovací měření vedení (fáze-N a fáze-fáze pro třífázový obvod) a smyčkové impedance (fáze-PE). Měřící parametry a limity, by měly být voleny v závislosti na instalované pojistce. Pro stanovení ztrát na vedení AC strany, by měl být také změřen úbytek napětí, jehož hodnota má být co nejmenší, protože ztráty na vedení snižují výkon FV systému. [35]

Testování proudového chrániče (RCD)

Je-li RCD instalován na střídavé straně FV systému musí být testován. Nejlepší je provést kompletní RCD test, který zahrnuje citlivostní test (tj. bez vybavení) při $0,5xI_{dN}$, test vypínacího času při $1xI_{dN}$ a $5x I_{dN}$ a také test vybavovacího proudu (rampový test). [35]

Zkouška izolace mezi živými a uzemněnými částmi

Měla by být provedena zkouška izolace mezi vodiči v obvodu střídavého proudu (linka/N, N/země, linka/země pro jednu fázi a navíc linka/linka pro třífázové obvody). Izolační testy by měly být provedeny v odpojené síti a FV generátoru. Zkušební napětí pro 120V/240V AC instalace je 500V a limitní odpor alespoň $1 \text{ M}\Omega$. [35]

Kontinuita zemního vodiče

Spojení mezi PE svorkou měniče a hlavním zemním potenciálem na AC straně musí být ověřeno testem kontinuity. Test kontinuity se provádí při odpojeném vedení a FV generátoru. Velikost odporu by měla odpovídat materiálu, délce a průřezu vodičů. [35]

4.2.7 Měření V-A charakteristik

Měření ozáření musí být provedeno pomocí referenčního zařízení, kalibrovaného dle ČSN EN 60904-2 nebo pomocí pyranometru. FV referenční zařízení musí být spektrálně přizpůsobené zkušebnímu vzorku nebo musí být provedena spektrální korekce. Teplota testovaného zařízení musí být měřena přístrojem s přesností $\pm 1^\circ\text{C}$. Aktivní plocha testovaného zařízení musí být v jedné rovině s aktivní plochou referenčního zařízení a to s přesností $\pm 2^\circ$. Měření napětí a proudu musí být prováděno přístroji s přesností $\pm 0,2\%$ z napětí naprázdno a proudu nakrátko. [39]

Měření může být provedeno v případě, že sluneční záření během měření nekolísá o více než $\pm 1\%$ a ozáření je nejméně 600 W/m^2 . Při měření musí být klimatické podmínky pečlivě kontrolovány (žádné mraky a podíl difuzního záření menší než 30%). [39]

Měřicí přístroje

Měření intenzity slunečního záření

Nejvhodnějším přístrojem pro měření je fotovoltaické referenční zařízení, které má stejnou spektrální citlivost jako testované zařízení, díky tomu není nutné provádět případné korekce a tím zavádět do měření další nejistoty. Při správném provedení dané korekce jsou vzniklé nejistoty zanedbatelné a proto je možné pro měření intenzity záření použít i referenční zařízení s málo rozdílnou spektrální citlivostí nebo pyranometry a následně provést spektrální korekci. [34]

V případě měření intenzity slunečního záření pomocí pyranometrů je zapotřebí použít také vhodný spektroradiometr, který je schopný měřit spektrální rozložení záření slunečního světla v rozsahu spektrální citlivosti testovaného vzorku.

Měření teploty FV panelu a referenčního zařízení

Měření teploty lze principiálně provádět dvěma způsoby, kontaktními nebo bezkontaktními metodami, v prvním případě pomocí snímačů teploty, v druhém pyrometry nebo FLIR kamerami. Problém bezkontaktních měření způsobuje nízká emisivita panelu, omezená přesnost měření a zajištění vhodného venkovního provozu, z toho důvodu se termokamery užívají zejména pro odhalení defektů FV panelů, vadných spojů a pro studii teplotního rozložení. Více o měření termokamerami je uvedeno v následující kapitole. [34]

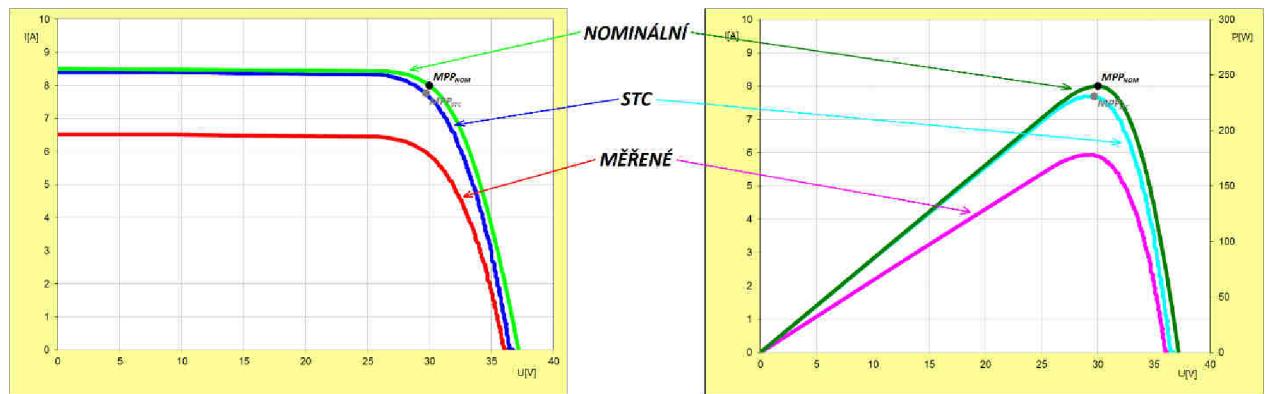
Pro měření teploty FV panelu je tedy vhodné použít kontaktní metody. Kontaktní snímače se proto umisťují na zadní stranu FV, kde jsou zastíněny samotným panelem a méně ovlivňovány okolím. Mezi vhodné snímače teploty patří termočlánky a termistory (platinové, polovodičové), avšak nejvýhodnější je i přes relativně vysokou cenu použití inteligentních digitálních snímačů, které v jednom pouzdře integrují jak vlastní analogový snímač, tak i obvody pro zpracování a digitalizaci výstupního signálu. [34]

Při měření teploty je důležitým faktorem rychlost proudění vzduchu, proto je zapotřebí provádět měření V-A charakteristik při minimální rychlosti proudění vzduchu, které nebude ovlivňovat měření teploty FV panelů.

Vyhodnocení

Pokud je pro měření ozáření použit pyranometr nebo zařízení s jinými vlastnostmi než zkoušený vzorek, je zapotřebí provádět současně měření spektrální intenzity záření pomocí spektorradiometru a následně vypočíst efektivní ozáření vzorku pro AM 1,5. [39]

Jsou-li k dispozici údaje o klimatických podmínkách a technická data FV modulů, lze jednotlivé body V-A charakteristiky přepočítat na STC hodnoty a posléze lze přepočtenou (V-A)_{STC} křivku porovnat s nominální (V-A)_{nom} křivkou. [39][35]



Obr. 4.2-1 Měřené, nominální a STC $U(I)$, $P(I)$ křivky

Pozn. V následujícím textu a obrázcích budou indexem „NOM“ značeny jmenovité hodnoty udávané výrobcem, indexem „MĚŘ“ hodnoty měřené a indexem „STC“ měřené hodnoty přepočtené na STC.

Pro rovnoměrně osvětlený FV modul/string/pole by měly být naměřené a přepočtené V-A křivky podobné jmenovité (nominální) křivce. Každá nerovnoměrnost ozáření modulu může mít vliv na výsledné vlastnosti V-A charakteristiky. Tento účinek je způsoben bypass diodami v propojovacím obvodu modulu, reverzní V-A charakteristikou článků a distribucí ozáření v testovací oblasti. Také U_{OCSTC} , I_{SCSTC} , MPP_{STC} na $V-A_{STC}$ křivce by měli být podobné jmenovitým hodnotám. Výsledky +0% a -5% jsou typické pro řádně pracující moduly. [35]

Pro string či pole složené z více stejných modulů mohou být jmenovité hodnoty V-A křivky vypočteny ze jmenovitých modulových hodnot. Ztráty nejsou obvykle uvažovány. [35]

4.2.8 Účinnost MPP trackeru (ověření správného nastavení bodu MPP)

Toto ověření slouží pro kontrolu, zda MPP tracker měniče nastavuje optimální pracovní bod na základě aktuálních podmínek. Pro získání přesnějších výsledků, by při měření měla být hodnota ozáření co nejvyšší (nejméně 600W/m^2 , nejlépe nad 800W/m^2). [35]

Postup je následující:

- Proveďte měření V-A charakteristiky. FV generátoru musí být během měření odpojen od měniče. Tvar křivky by neměl vykazovat žádné neočekávané anomálie
- Připojte FV generátor zpět k měniči a změřte aktuální hodnotu napětí $U_{m\check{e}r}$ na vstupu měniče. Pro získání přesnějších výsledků sledujte a zaznamenejte hodnotu ozáření a teplotu
- Pomocí softwarového nástroje modifikujte změřenou V-A charakteristiku dle ozáření a teploty zjištěné v předchozím bodě, tj. při měření napětí
- Najděte $U_{m\check{e}r}$ na modifikované V-A křivce, dle Obr.4.2-2, a definujte odpovídající stejnosměrný proud. Dvojice ($U_{m\check{e}r}, I$) na modifikované V-A křivce je pracovní bod nastavovaný trackerem
- Srovnajte MPP na modifikované V-A křivce a výkon daný párem ($U_{m\check{e}r}, I$) na modifikované V-A křivce [35]

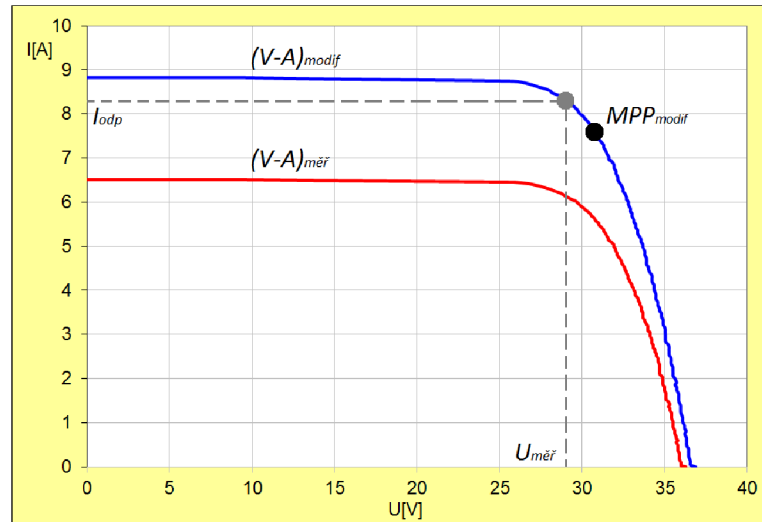
$$Dif f_{MPP} = \left(1 - \frac{U_{m\check{e}r} * I_{odp}}{MPP_{modif}}\right) * 100 \quad (10)$$

, kde

$U_{m\check{e}r}$ aktuální hodnota napětí změřená na vstupu invertoru

I proud odpovídající $U_{m\check{e}r}$

MPP_{modif} modifikovaný výkon MPP na V-A charakteristice [35]



Obr. 4.2-2 Srovnání naměřených hodnot MPP

Při měření nejsou zapotřebí proudové kleště pro měření DC proudu, proto je měření dostatečně přesné a V-A charakteristika může být modifikována na přesné klimatické podmínky. Rozdíl menší než 5% znamená, že měnič správně nastavuje bod MPP. Pokud V-A křivka nemá ideální tvar nebo je hodnota ozáření příliš nízká může mít měnič problémy se správným nastavením bodu MPP. [35]

4.2.9 Ověření účinnosti měniče

Toto ověření slouží pro kontrolu účinnosti střídače při momentálních podmínkách, která by se měla pohybovat okolo 95% a výše.

Postup je následující:

- Zkontrolujte stabilitu klimatických podmínek. Hodnota ozáření by měla být co nejvyšší (nejméně $600\text{W}/\text{m}^2$, nejlépe nad $800\text{W}/\text{m}^2$), s cílem získat přesnější výsledky
- Změřte aktuální DC napětí U_{inp} a proud I_{inp} na všech vstupech měniče
- Změřte aktuální AC napětí U_{out} a proud I_{out} na všech výstupech měniče
- Vypočítejte účinnost dle níže uvedených rovnic a porovnejte s údaji výrobce [35]

$$P_{vst} = \sum_1^n (U_{vst_n} * I_{vst_n}) \quad (11)$$

$$P_{výst} = \sum_1^n (U_{výst_n} * I_{výst_n}) \quad (12)$$

$$\eta_{inv} = \frac{P_{výst}}{P_{vst}} \quad (13)$$

, kde

P_{vst} je vstupní výkon invertoru daný součinem vstupního napětí U_{vst_n} a proudu I_{vst_n}

$P_{výst}$ je výstupní výkon invertoru daný součinem výstupního napětí $U_{výst_n}$ a proudu $I_{výst_n}$

η_{inv} účinnost invertoru při aktuálních podmínkách

n značí n-tý vstup měniče [35]

4.2.10 Faktory ovlivňující průběh měření

Sluneční záření a teplota se mění s časem. Sluneční záření závisí na geografické poloze, denní době, ročním období, poloze a sklonu FV modulů. FV články dodávají více energie při nižších teplotách, např. výkon článku je při teplotě 50°C o 20% menší než při 20°C. [39][35]

Pomalé změny

Pokud je obloha jasná, ozáření a teplota se mění předvídatelně, tak je rychlost změn natolik pomalá, že doba měření nebude způsobovat problémy. Hodnota ozáření by však měla být pro získání platných a srovnatelných výsledků alespoň 600 W/m². Pokud jsou při měření k dispozici hodnoty ozáření a teploty lze naměřené hodnoty přepočítat na STC, aby bylo možné provést přesnější srovnání. [39][35]

Rychlé změny

Proměnné počasí způsobuje nestabilní podmínky pro testování. Mraky, mlha a difuzní záření snižují hodnotu ozáření. Zvláště difuzní záření je někdy obtížné vnímat. Při takovýchto podmínkách mohou výkyvy ozáření dosahovat až 10% během několika sekund, což způsobuje měření náročnějším či dokonce nemožným. [39][35]

V případě, že je obloha polojasná, je nutné při testování ověřit, zda je celé měřené FV zařízení rovnoměrně osvětlené, zda dané klimatické podmínky jsou vyhovující a také zda při měření není přítomno měnící se difuzní záření a mraky nezastiňují žádnou část měřeného FV generátoru. Dokonce i malé zastínění části modulu může způsobit nepoužitelnost výsledků. Plynulost a použitelnost měření tedy vychází z pečlivého zkoumání oblohy. [39][35]

Měřené výsledky je nutné pečlivě zkontrolovat. Jsou-li kolísavé, nelze je považovat za směrodatné. Nejsou-li STC hodnoty blízké nominálním hodnotám, mohou být pravděpodobně špatně. Znalost parametrů klimatických podmínek během měření je velice důležitá, protože ovlivňují naměřené hodnoty U , I , U_{OC} a I_{SC} . Kromě klimatických parametrů neexistují žádné další informace, které by potvrdily, zda je měření platné. Záznam I_T a T , a také analýza tvaru V-A křivek je nejlepší kombinace pro získání platných výsledků při nestabilních klimatických podmínkách. [39][35]

4.2.11 Typické problémy a defekty FV generátorů a jejich vliv na tvar V-A křivky

Typické problémy FV generátorů jsou:

- Stíny
- Špína
- Poruchy jednotlivých FV modulů
- Přenosové ztráty (na vedení)
- Stárnutí
- Poruchy měniče

Všechny problémy mají za následek snížení bodu MPP a tím i výkonu celého systému. Většina problémů a defektů FV generátorů se projevuje jako anomálie na V-A křivce. [35]

Na tvar V-A křivek mohou mít nemalý vliv také chyby měření a stanovení parametrů FV generátorů, typické chyby měření a jejich vliv je popsán níže.

Chyby měření a stanovení parametrů FV generátorů

Měření V-A křivek může být zatíženo různými chybami. Před další analýzou výsledků musí být provedena kontrola chyb měření.

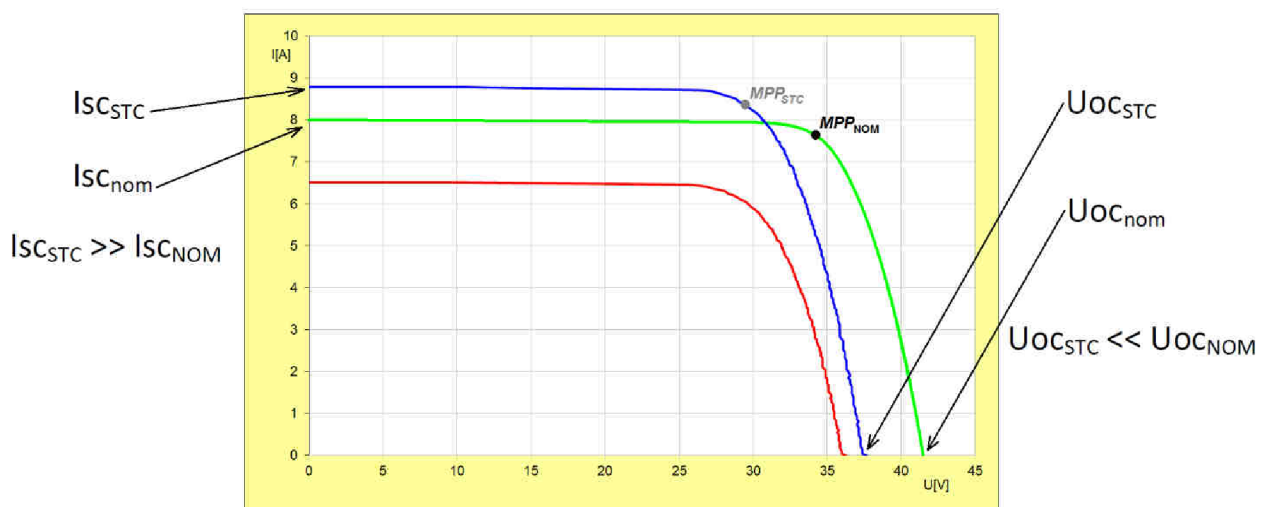
Typické chyby měření jsou:

- Nesprávné modulové údaje: U_{OC} , I_{SC} , U_{MPP} , I_{MPP} , P_{MPP} , α , β , chybějící hodnota R_s
- Špatně určený počet modulů ve stringu
- Špatně určená teplota
- Změna ozáření [35]

Tyto chyby se projevují:

- Příliš vysokým či příliš nízkým U_{OC}
- Příliš vysokým či příliš nízkým I_{SC}
- Anomáliemi (odchylkami) ve tvaru V-A charakteristik

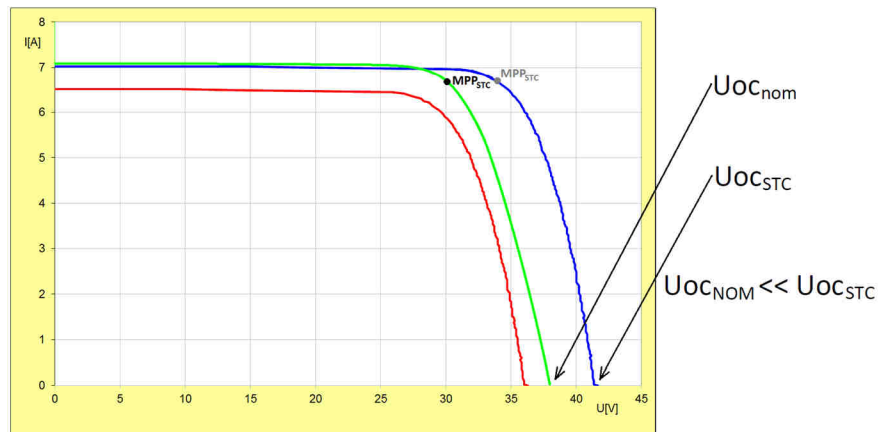
Některé měřicí přístroje umožňují pozdější změnu zadávaných modulových dat či klimatických podmínek (pro korekci hodnot) a provedené testy nemusí být opakovány. [35]



Obr. 4.2-3 Projev nesprávně určených modulových údajů či chybného měření

Příliš vysoké či příliš nízké U_{OC}

- *Chybně určená teplota*, je nutné zkontrolovat způsob a kvalitu upevnění snímače teploty. V případě potřeby upravit montáž senzoru a opakovat měření. Na Obr. 4.3-2 v kapitole 4.3 je zobrazena správná i chybná montáž teplotního senzoru.
- *Špatné modulové údaje*, je nutné zkontrolovat hodnoty U_{OC} a β , případně upravit vstupní hodnoty srovnávacího nástroje.
- *Nesprávný počet modulů ve stringu*, je nutné zkontrolovat projektovou dokumentaci a současně provedení FV systému a případně definovat správný počet modulů do srovnávacího nástroje. [35]



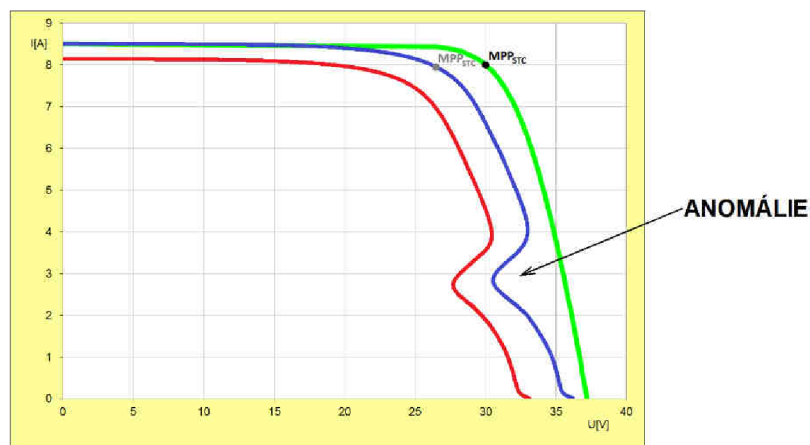
Obr. 4.2-4 Nesprávný počet modulů ve stringu

Příliš vysoký či příliš nízký I_{SC}

- *Chybně určená hodnota ozáření*, je nutné zkontrolovat způsob a kvalitu upevnění snímače a také hodnotu ozáření, pokud je ozáření příliš nízké, přepočítání na STC nelze provést. Možným východiskem je úprava montáže snímače nebo vyčkání na vyšší hodnotu ozáření. Na Obr. 4.3-1 v kapitole 4.3 je zobrazena správná montáž pyranometru.
- *Ozáření se během měření změnilo*, v případě, že hodnota ozáření na začátku a na konci měření není stejná, je nutné opakovat měření při stabilních klimatických podmínkách (při konstantním ozáření).
- *Špatné modulové údaje*: je nutné zkontrolovat hodnoty I_{SC} a α , případně upravit vstupní hodnoty srovnávacího nástroje. [35]

Anomálie ve tvaru V-A charakteristik

Jsou způsobeny krátkodobými změnami ozáření během měření V-A křivky, je zapotřebí zopakovat měření při stabilních klimatických podmínkách. [35]



Obr. 4.2-5 Náhlá změna ozáření během měření

Chyby FV modulů či stringů

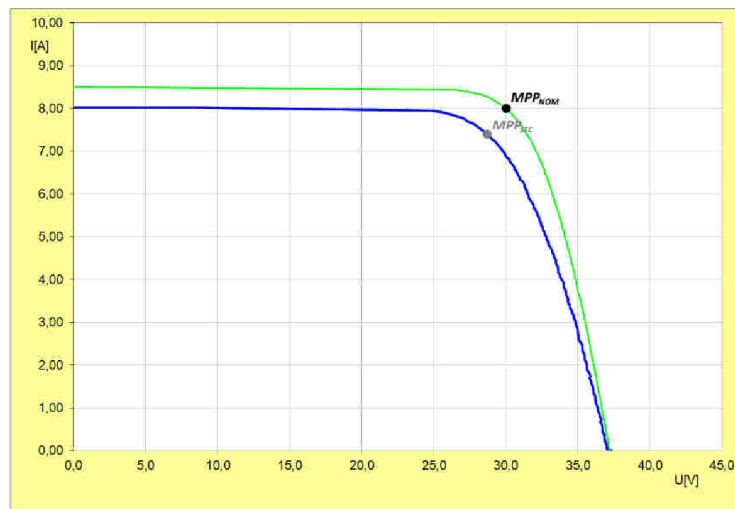
Jak již bylo řečeno, nejdříve je zapotřebí eliminovat výše uvedené chyby měření, pokud jsou však anomálie V-A křivky stále přítomny, je zapotřebí provést další a důkladnější analýzu V-A křivky.

Tyto chyby se projevují:

- Příliš malou hodnotou I_{SC}
- Příliš malou hodnotou U_{OC}
- Anomáliemi ve V-A charakteristice [35]

Příliš malá hodnota I_{SC}

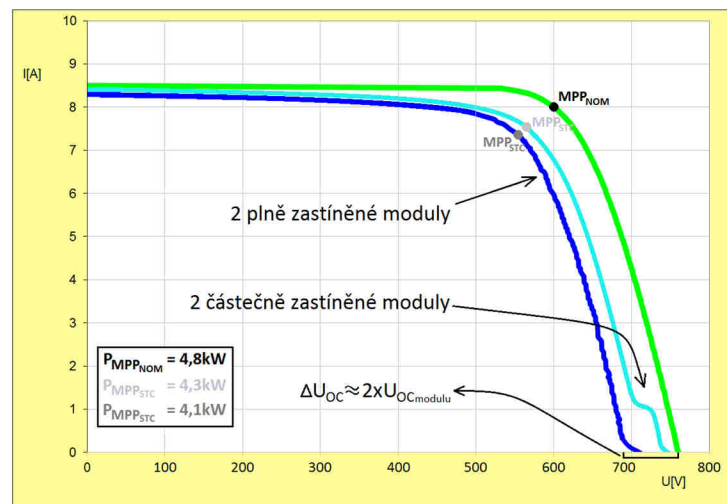
Možným důvodem je rovnoměrné znečištění aktivního povrchu modulu, poškozené krycí sklo, rozptýlený stín od vzdálené překážky mající stejný vliv jako nižší ozáření, stárnutí či LID. [35]



Obr. 4.2-6 Vybledlý (zestárlý) či rovnoměrně znečištěný FV modul

Příliš malá hodnota U_{OC}

Možným důvodem jsou zastíněné nebo poškozené moduly (by-pass sektory) či poškozené samotné by-pass diody. Následující Obr. 4.2-7 ukazuje vliv plně a částečně zastíněných modulů ve FV stringu složeném z 23 modulů. [35]



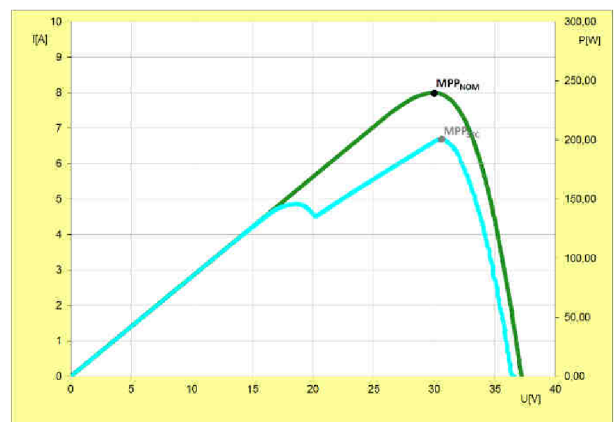
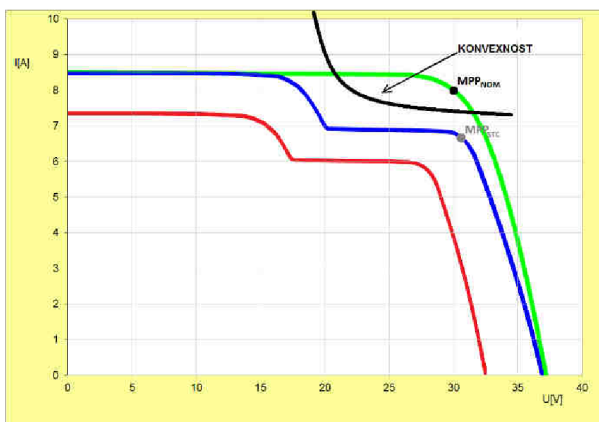
Obr. 4.2-7 Vliv zastíněných FV modulů na V-A charakteristiku FV stringu

Konvexnost V-A charakteristiky

V-A křivka není jednotná a má schodovitý tvar a bod MPP je výrazně nižší. Dokonce i malé stíny mají velký vliv.

Možné důvody:

- Částečné zastínění modulu či stringu
- Ptačí trus
- Překážka blízko modulů
- Difuzní záření- mlha či vysoká oblačnost ovlivňující pouze část řetězce
- Prach a jiné znečištění na části modulu nebo stringu
- Mechanické změny na FV panelech (zakalení skla, zežloutnutí fólie)
- Mechanické poškození FV panelů (krupobití) [35]

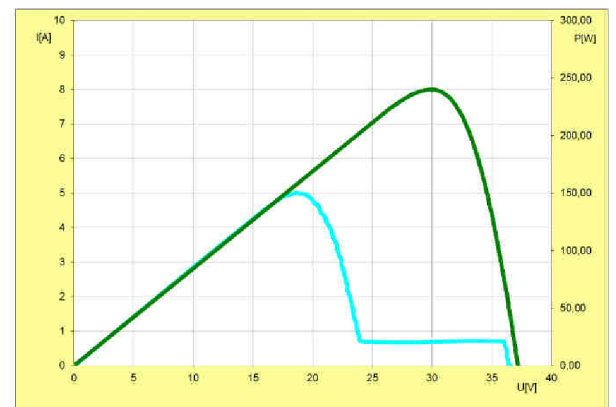
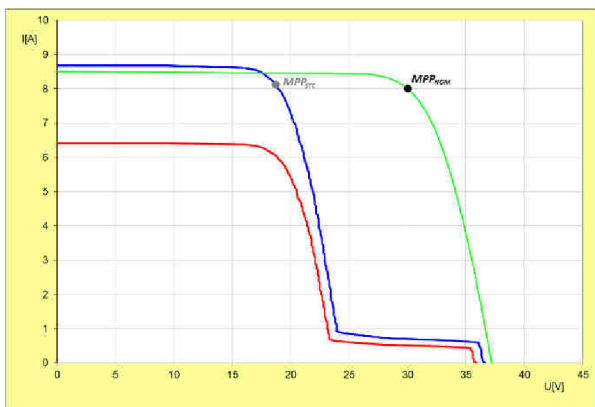


Obr. 4.2-8 Částečně zastíněný FV modul

Další anomálie na V-A charakteristice

Mohou být způsobeny překážkou, která kompletně zakrývá (zastiňuje) část FV modulu. Na část FV generátoru pod překážkou nedopadá žádné světlo nebo pouze difuzní záření. [35]

Obrázek 4.2-9 ukazuje vliv úplného zastínění FV článků v jednom by-pass sektoru na V-A charakteristiku FV modulu. [35]



Obr. 4.2-9 Vliv plně zastíněného by-pass sektoru FV modulu

Příliš nízký bod MPP

Možné důvody:

- Přídavný sériový odpor ve stringu způsobující ztráty na vedení, kontaktech atd.
- Špatné kontakty
- Propojovací (kontaktní) problém ve FV modulu
- Koroze
- Poddimenzované kabely [35]

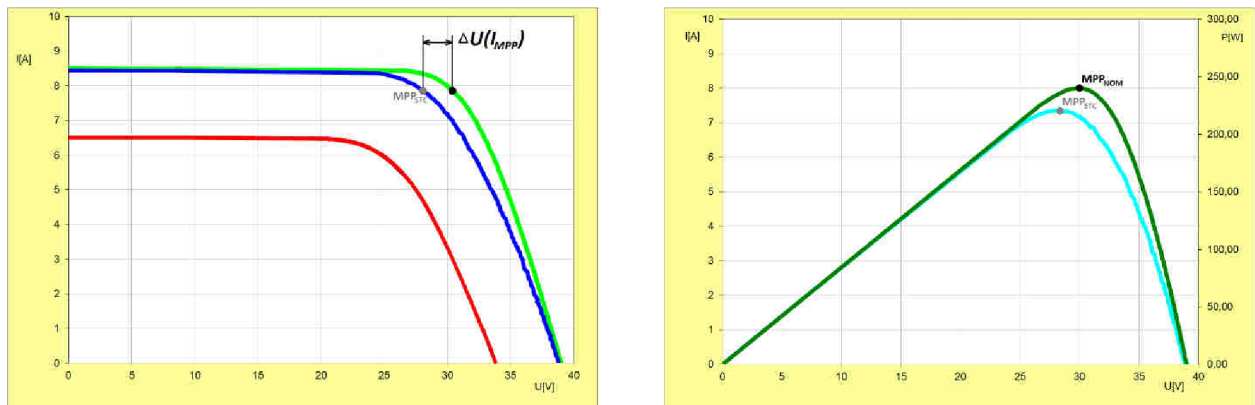
Výpočet přídavného sériového odporu:

$$R_{ztr} = \frac{\Delta U(I_{MPP_{STC}})}{I_{MPP_{STC}}^2} = \frac{(U_{nom}(I_{MPP_{STC}}) - U_{MPP_{STC}})}{I_{MPP_{STC}}^2} \quad (14)$$

, kde

R_{ztr}	přídavný sériový odpor
ΔU	napěťový rozdíl mezi STC a jmenovitým napětí při I_{MPP}
I_{MPP}	měřený MPP proud přepočtený na STC
U_{nom}	jmenovité napětí při I_{MPP}
U_{MPP}	měřené MPP napětí přepočtené na STC

Energie se ztrácí uvnitř vedení propojujícího daný string a vlivem dalších sériových odporů místo, aby byla dodávána do měniče. Vyšší vliv na část konstantního proudu V-A křivky. Bod MPP je o něco nižší, jak lze vidět na obrázku 4.2-10. [35]



Obr. 4.2-10 Vliv dodatečného sériového odporu

4.2.12 Měření termo-kamerou

Účelem kontroly IR kamerou je detekce neobvyklé změny teploty provozovaného FV panelu v systému. Tyto změny teploty mohou ukazovat na problémy v rámci samotných modulů či celého FV pole, mezi které patří reverzní chod článku, selhání bypass diody, selhání pájených spojů, špatné kontakty či propojení a další příčiny, které vedu k lokálnímu nárůstu teploty.

Toto testování může být součástí jak počáteční, tak i periodické kontroly PV systému. Může být také použito k řešení při podezření na problém v PV modulu, stringu či poli.

Použití termo-kamery poskytuje při kontrole fotovoltaických systémů několik výhod, mezi něž patří snadno viditelné zobrazení anomálií na přehledných termografech a oproti většině ostatních metod, lze termo-kameru použít pro měření během normálního provozu elektrárny. Nezanedbatelnou výhodou je rychlost měření, protože termo-kamera umožňuje změřit velké plochy v relativně krátkém čase. [38]

Postup kontroly a měření termo-kamerou

Při kontrole by měla být FVE v normálním pracovním režimu (dle MPP trackeru), velikost ozáření v rovině testovaného prvku by měla být alespoň 600 W/m^2 , v ideálním případě pro dosažení dostatečného teplotního kontrastu je doporučovanou velikostí 800 W/m^2 . Průběh a výsledky měření závisí na poloze elektrárny a místním počasí. Ke zvýšení kontrastu mohou přispět také nízké venkovní teploty. [38]

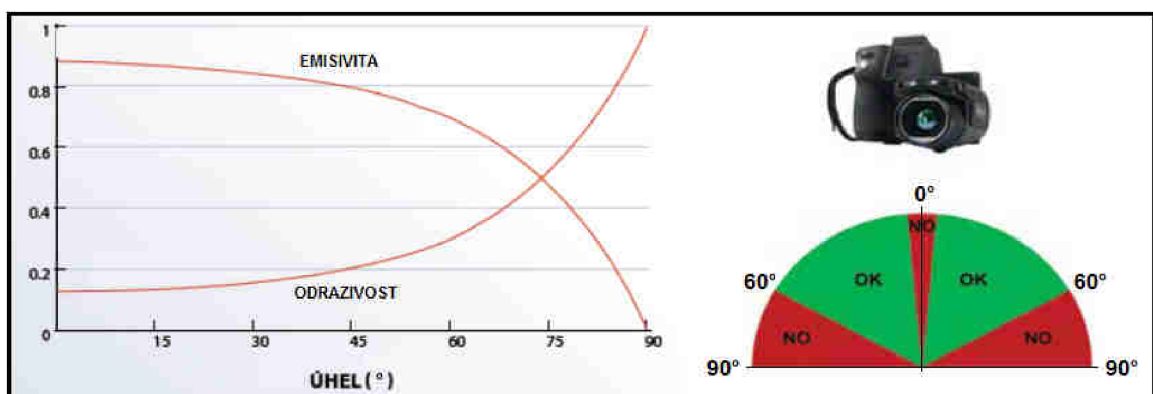
Při kontrole modulu v poli je zapotřebí věnovat zvláštní pozornost blokovacím diodám, rozvodným skříním, elektrickým kontaktům nebo dalším konkrétním problémům, které vykazují rozeznatelný teplotní rozdíl oproti jeho bezprostřednímu okolí.

Vhodný typ termo-kamery

Citlivost běžných termo-kamer se pohybuje mezi 8 až $14 \mu\text{m}$ vlnové délky. Krycí sklo FV panelů není v této oblasti transparentní a pokud je kontrola prováděna zepředu, je pomocí termo-kamery možné přímo vidět pouze rozložení teplot na povrchu skla a jen nepřímo rozložení teploty u podkladových článků, to způsobuje, že teplotní rozdíly na skleněném povrchu FV panelu jsou pro měření velmi malé a proto je zapotřebí použít termo-kameru s teplotní citlivostí $\leq 0,08 \text{ K}$. Pro jasné zobrazení malých teplotních rozdílů by měla termo-kamera umožňovat manuální nastavení úrovně a rozsahu. FV panely se obvykle montují na vysoce reflexní hliníkové rámy, které odráží tepelné záření z oblohy a projevují se na termografu jako chladné oblasti s teplotou pod 0°C , což způsobuje, že drobné teplotní anomálie nejsou okamžitě viditelné, protože termo-kamera automaticky přizpůsobuje svůj rozsah maximální a minimální měření teplotě. Z toho důvodu je zapotřebí pro dosažení vysokého kontrastu neustálá ruční korekce měřicího rozsahu nebo je případným řešením tzv. DDE neboli digitální zvýraznění detailů, funkce, která automaticky optimalizuje kontrast obrazu při vysokém rozsahu měřených teplot. [38]

Úhel měření, odrazivost a emisivita

I přes to, že sklo má na vlnových délkách 8 až $14 \mu\text{m}$ emisivitu v rozsahu $0,85$ - $0,9$, není bezdotykové měření teploty jeho povrchu snadné, protože odrazy okolního tepelného záření na jeho povrchu mohou způsobit chybnou interpretaci naměřených. Emisivita je v kolmém směru nejvyšší a s rostoucím úhlem klesá, avšak pro zamezení odrazu termo-kamery a její obsluhy ve skle, by měření nemělo probíhat kolmo k měřenému panelu, ale spíše pod úhlem, přičemž úhel 5 - 60° je dobrým kompromisem, což je patrné z Obr. 4.2-11. [38]



Obr. 4.2-11 Emisivita a odrazivost dle úhlu měření, doporučený úhel měření [38]

Měření na zadní straně FV panelů

Ve většině FVE lze termo-kamerou kontrolovat instalované FV panely z jejich zadní strany, čímž se minimalizují rušivé odrazy slunce a mraků, které by mohl způsobit chybné měření. Navíc teploty naměřené na zadní mohou být vyšší, protože teplota článků je měřena přímo a ne přes povrch skla.

Okolní podmínky měření

Během termografické kontroly by měla být jasná obloha, protože mraky způsobují rušení v důsledku vzniklých odrazů a také snižují intenzitu slunečního záření. Pomocí termo-kamery s dostatečnou citlivostí lze pořídit informativní snímky i při zatažené obloze. Hlavní požadavek je při měření kladen na proudění vzduchu, které musí být minimální, protože způsobuje u povrchu FV modulu konvekční chlazení, a tím se snižuje teplotní gradient. Pro zvýšení kontrastu lze panel odpojit od zátěže, čímž se zamezí průtoku proudu a dochází pouze k samovolnému ohřevu slunečním zářením, následně se zátěž připojí zpět a články se pozorují při ohřevu. [38]

Chyby měření a vyhodnocení výsledků

Nejvíce chyb vzniká v důsledku špatného držení termo-kamery a v důsledku nevhodných okolních a klimatických podmínek měření. Mezi typické chyby měření patří příliš malý úhel, změna intenzity slunečního záření v průběhu měření (např. oblačnost), odrazy (slunce, mraky, okolní budovy) a částečné stíny (okolní předměty, budovy a stavby). [38]

Pro vyhodnocení měření by se měli srovnat termografy získané při zatížení, naprázdno a ve zkratu. Zjištěné teplotní extrémy mohou v závislosti na tvaru a umístění naznačovat různé typy poruch a tudíž musí být zřetelně označeny, každou zjištěnou teplotní anomálii, je zapotřebí prověřit a zjistit, co by mohlo být její příčinou a to pomocí vizuální kontroly a elektrického testování. V některých případech může být užitečným nástrojem srovnání změřené I-V charakteristiky modulu či více modulů s teplotní anomálií a I-V charakteristiky modulu bez jakýchkoliv teplotních anomálií. Příklady a projevy jednotlivých detekovatelných poruch jsou uvedeny v tabulce níže.

Typ chyby	Příklad	Projev na teplotním snímku
Výrobní vada	Nečistoty a plynové kapsy	Horké nebo studené místo
	Trhliny v buňkách	Přehřívání článků
Poškození	Trhliny	Přehřívání článků
	Trhliny v buňkách	Část článků se jeví teplejší
Nečistoty	Znečištění, vlhkost	Horká místa
	Ptačí trus	
Vadné bypassové diody (způsobují zkrat a snižují ochranu obvodů)	Proražení, vyhoření	Mozaikový vzor
Vadná připojení	Panel nebo řetězec není připojen	Modul nebo řetězec je trvale teplejší
	Nežádoucí přechodový odpor v konektoru nebo pájeném spoji	Spoje nebo konektory se přehřívají
Poškození či přetížení měniče	Vnitřní porucha nebo nadměrný výkon přiváděný na vstup měniče	Měnič se přehřívá

Tab. 4.2-2 Příklad poruch a jejich projevů detekovatelných pomocí termo-kamery [38]

4.2.13 Zpráva o testování

Po ukončení testovací musí být vytvořena příslušná výstupní zpráva. Tato zpráva musí obsahovat následující:

- Souhrnné informace popisující systém
- Seznam testovaných prvků či obvodů
- Záznam o kontrole
- Záznam o výsledcích testů pro každý testovaný prvek
- Při jištění případných chyb, doporučení pro jejich opravu či zlepšení
- Doporučenou lhůtu pro další testování s ohledem na typ systému, jeho použití a provoz, četnost a kvalitu údržby a také s ohledem na vnější vlivy
- Podpis osoby provádějící testy
- Dodatečné informace týkající se osoby zodpovědné za provedení a konstrukci systému [39]

4.2.14 Korekce naměřených hodnot

Výkon FV generátoru je závislý na úrovni ozáření a teplotě. Měření prováděná v různém čase nelze přímo srovnávat. Přepočet na STC (standardní testovací podmínky, které jsou definovány v ČSN EN 60904) umožňuje porovnávat výsledky měření FV zařízení, které byly zjištěny při různých klimatických podmínkách a čase.

Existují tři postupy pro korekci naměřených hodnot na jiné požadované teplotní podmínky a ozáření (např. STC). První dva postupy jsou algebraické a vyžadují známé korekční parametry daného FV zařízení, pokud nejsou známé je třeba je stanovit před provedením korekce. Třetí postup je založen na použití metody interpolace, u níž nejsou zapotřebí známé korekční parametry, a může být použit, pokud byly například V-A charakteristiky pro dané zařízení naměřeny alespoň třikrát a to při teplotách a ozářeních pro které je způsob korekce použitelný. [39]

Protože většina měřících přístrojů pro diagnostiku FVE je vybavena algoritmy pro přepočet naměřených hodnot, které nejčastěji využívají druhý z uvedených postupů, není tedy zapotřebí zde uvádět zbylé dva postupy, které jsou definovány v technické normě ČSN EN 60891.

Postup korekce

Tento postup je založen na zjednodušeném jedno diodovém modelu FV zařízení. Korekční rovnice obsahuje pět korekčních parametrů, mezi něž patří teplotní koeficienty pro zkratový proud (α), napětí naprázdno (β) a špičkový výkon (δ), přičemž tyto koeficienty jsou platné, v rozmezí $\pm 30\%$ od hodnoty ozáření při kterém byli naměřeny, dále se zde používá dodatečný teplotní koeficient (κ'), který odpovídá změnám vnitřního sériového odporu R'_S s teplotou. Tento postup je využíván například v přístrojích METREL. [39]

Korekční postup je definován následujícími rovnicemi pro napětí a proud:

$$I_{STC} = I_1 + I_{SC} \left(\frac{I_{rrSTC}}{I_{rr}} - 1 \right) + N * \alpha * (T_{STC} - T_1) \quad (15)$$

$$U_{STC} = U_1 - \frac{M}{N} * R_S * (I_{STC} - I_1) + M * \beta * (T_{STC} - T_1) \quad (16)$$

, kde

I_1, U_1 jsou souřadnice bodů na naměřených charakteristikách

I_{STC}, U_{STC} jsou souřadnice odpovídající bodům na korigovaných charakteristikách

I_{SC} měřený zkratový proud

I_{rr}	je měřené ozáření
I_{rrSTC}	je ozáření při STC
T_1	je změřená teplota testovaného vzorku
T_{STC}	je teplota při STC
α a β	jsou teplotní koeficienty proudu a napětí testovaného zařízení
R_S	je vnitřní sériový odpor testovaného zařízení
M	Počet paralelních modulů
N	Počet sériových modulů

Popis metod pro stanovení R_S je uveden v technické normě ČSN EN 60891, ale vzhledem k tomu že definované metody jsou velice obtížně proveditelné, protože vyžadují vypočítat R_S na bázi tří a více měření při třech různých úrovních ozáření při zachování všech ostatních parametrů beze změny. Lze pro obecné měření a přepočítání na STC použít hodnotu sériového odporu $10\text{m}\Omega/\text{článek}$, avšak pro přesné vyhodnocení měření musí být určena pro každý modul přesná hodnota R_S . Pro přesné zjištění hodnoty R_S , lze použít různé algoritmy či postupy definované výrobcí jednotlivých měřících přístrojů. Někteří výrobci využívají speciálního algoritmu, který umožňuje výpočet R_S na bázi měření jedné V-A charakteristiky. [35]

Měření V-A charakteristiky se obvykle provádí v blízkosti invertoru, proto jsou výsledky měření ovlivněny odporem vodičů propojujících moduly a střídač, kontaktním odporem v DC rozvodné skříni a úbytkem napětí na blokovacích diodách. Z praktických zkušeností lze však tyto přídatné ztráty ve většině případů zanedbat, protože vzhledem k velikosti napětí stringu nezpůsobují znatelný úbytek napětí. Nicméně se tato skutečnost může v průběhu času výrazně měnit, zejména v případě, kdy dojde ke změně kontaktního odporu, protože moduly a kabely jsou vystaveny extrémním povětrnostním podmínkám a proto podléhají změnám. Vyšší rezistence znamená menší energetickou účinnost FV generátoru a v extrémním případě může, z důvodu přehřívání, způsobit i požár. [39][35]

4.2.15 Spektrální korekce naměřených hodnot V-A charakteristik

Vzhledem k tomu, že má FV zařízení odezvu závislou na vlnové délce, je jeho výkon značně ovlivněn spektrálním rozložením dopadajícího záření. V případě, že je ozáření měřeno teplotním typem pyranometru nebo pomocí referenčního solárního článku, které nejsou spektrálně selektivní s testovaným zařízením, musí být spektrální rozložení dopadajícího záření známé, aby bylo možné provést potřebné korekce pro zjištění výkonu FV zařízení při referenčním spektrálním rozložení záření definovaném v ČSN EN 60904-3. [39]

Pokud má referenční FV zařízení stejnou relativní spektrální odezvu jako testované FV zařízení jsou automaticky brány v úvahu vzniklé odchylky skutečného spektrálního rozložení světla a žádné další spektrální korekce není nutné provádět. V tomto případě umístění ani klimatické podmínky nemají výrazný vliv na venkovní výkonové měření. Postup pro případnou korekci chyby, vzniklé při testování FV zařízení, způsobené rozdílným testovacím a referenčním spektrem a také rozdílnou spektrální citlivostí (SR) referenčního článku a testovaného vzorku popisuje část normy ČSN EN 60904-7. [39]

4.3 Měřicí zařízení a vybavení pro diagnostiku FVE

4.3.1 Bezpečnost

Bezpečná konstrukce a vysoká ochrana měřicího zařízení je velice důležitá, protože mnoho FV systémů generuje napětí blízké 1000V DC a je připojených k AC instalaci s napětím 230/400V. [35]

Minimální požadavek na kategorie FV měřících zařízení je:

- DC 1000V CAT I
- AC 300V CAT III

Většina FV testerů má vyšší měřící kategorie a to 1000V CAT II pro DC a 300V CAT IV pro AC, přičemž vyšší stupeň ochrany znamená lepší odolnost zařízení. [35]

Měřicí zařízení způsobuje zkrat při měření I_{sc} a zátěž při měření V-A charakteristiky. Polovodiče v obvodu přístroje jsou během těchto testů značně namáhány, a pokud dojde k jejich selhání, nastane trvalý zkrat. I přes skutečnost, že FV přístroje jsou konstruovány pro bezpečné udržení trvalého zkratu, může dojít v okamžiku odpojení testovacích vodičů ke vzniku silného oblouku, jehož energie je závislá na napětí a proudu před odpojením. Energie oblouku může způsobit další poškození připojovacích bodů a testovacích vodičů a může dojít k ohrožení uživatele. Proto je dobrým zvykem používat odpínače zapojené mezi měřícím přístrojem a měřeným bodem FV systému. [35]

Někteří výrobci, např. METREL, používají tzv. bezpečnostní sondu, která může bezpečně odpojit FV zařízení od instalace v případě trvalého zkratu či jiné poruchy. Jedná se o elektronickou náhradu mechanického DC odpínače, jejíž zapínání a vypínání se provádí automaticky. Odpojení se provádí pomocí robustního vysokonapěťového relé, jehož výhodou je jednoduché připojení k FV testeru, bez nutnosti manuálního zapnutí či vypnutí. [35]

4.3.2 Proudový a výkonový rozsah

Během měření V-A charakteristiky měřicí zařízení zatěžuje FV generátor velmi vysokým výkonem (i více než 10kW) na krátkou dobu. Je třeba zvážit napěťovou, proudovou i výkonovou schopnost měřicího zařízení při měření V-A charakteristiky. [35]

Někteří výrobci používají vysoce kvalitní MOSFET technologie, které jsou specializovány pro tento typ aplikace, jejich zatížitelnost může být až 1000V/ 15A/ 15kW. [35]

4.3.3 Přesnost

4.3.3.1 Měření napětí a proudu

Přesnost měření elektrických parametrů (AC a DC napětí U , proudu I , napětí U_{oc} , proud I_{sc} ...) je obvykle vysoká. Většina měřících přístrojů měří AC a DC napětí a proudy se základní přesností menší než 2%. Pokud jsou pro měření proudu použity DC proudové kleště, měla by být zkontrolována chyba měření udávaná výrobcem. [35]

4.3.3.2 Měření V-A charakteristiky

Vzhledem ke krátkému času měření napětí a proudu je měření V-A charakteristiky velmi náročné. Je těžší dosáhnout podobné přesnosti jako při standardním měření napětí a proudu. Navíc vliv kapacit a indukčností FV systému může vážně narušit měření. Některé FV moduly mají značně vysoké kapacity a vedení má vždy určitou indukčnost, což může způsobit zkreslení měřících impulsů, které vede k vysoké chybě měření. Tato chyba může být mnohem vyšší než deklarovaná základní přesnost. Obecně delší měřící impulsy jsou méně náchylné na tento problém. Jsou-li výsledky testů podezřelé, zejména v případě, že test vždy selže u stejného typu FV modulů, je vhodné ověřit, zda je právě zkreslení impulsu skutečným problémem. [35]

4.3.3.3 Měření izolačního odporu DC a AC komponent FV systému

Maximální dovolená provozní chyba je 30% dle ČSN EN 61557-2 ed.2. Většina moderních testerů má však mnohem vyšší přesnost. Přesnost měření mohou výrazně ovlivnit svodové kapacity a indukčnosti, zmíněné výše, které však nejsou v technických normách uvažovány. [35]

4.3.3.4 Měření kontinuity

Maximální provozní chyba je 30% dle ČSN EN 61557-2 ed.2. Mnoho moderních testerů má mnohem vyšší přesnost. [35]

4.3.3.5 Chyba přepočtu na hodnoty STC

Výpočet STC přináší další chyby, které je třeba uvažovat. Patří mezi ně zejména chyba parametrů FV modulu a proto by tyto parametry měli být získávány ze spolehlivého zdroje. Výsledná chyba je vyšší, pokud se klimatické podmínky značně liší od referenčních (STC) klimatických podmínek, protože již samotný přepočet zavádí do výsledku určitou nejistotu. [35]

4.3.3.6 Chyba snímače ozáření

Ozáření ovlivňuje přesnost výpočtu STC největší mírou, proto je kladen velký důraz na přesnost a umístění měřící sondy. [35]

Pro typický FV modul platí, že:

- 10% chyba měření ozáření bude mít za následek cca 0,5% chybu napětí U_{STC} a 11% chybu proudu I_{STC} v bodě MPP
- 5% chyba měření ozáření bude mít za následek cca 0,3% chybu napětí U_{STC} a 5% chybu proudu I_{STC} v bodě MPP
- 2% chyba měření ozáření bude mít za následek cca 0,1% chybu napětí U_{STC} a 2% chybu proudu I_{STC} v bodě MPP [35]

Je doporučováno použití snímače ozáření (referenčního článku nebo pyranometru) s přesností lepší než 3%. Snímač ozáření by měl být pravidelně a průkazně kalibrován. Je také vhodné provádět měření při vysoké úrovni ozáření. [35]

Sklon snímače musí být přesně stejný jako sklon FV modulu, v opačném případě:

- 10° rozdíl bude mít za následek 0,5% chybu napětí U_{STC} a 11% chybu proudu I_{STC} v bodě MPP
- 5° chyba měření ozáření bude mít za následek cca 0,3% chybu napětí U_{STC} a 5% chybu proudu I_{STC} v bodě MPP

- 2° chyba měření ozáření bude mít za následek cca 0,1% chybu napětí U_{STC} a 2% chybu proudu I_{STC} v bodě MPP

Senzor by neměl zakrývat FV články, dokonce i malé zakrytí povrchu může výrazně snížit výkon FV generátoru, na Obr. 4.3-1 je uveden příklad správného a chybného umístění snímače ozáření. [35]

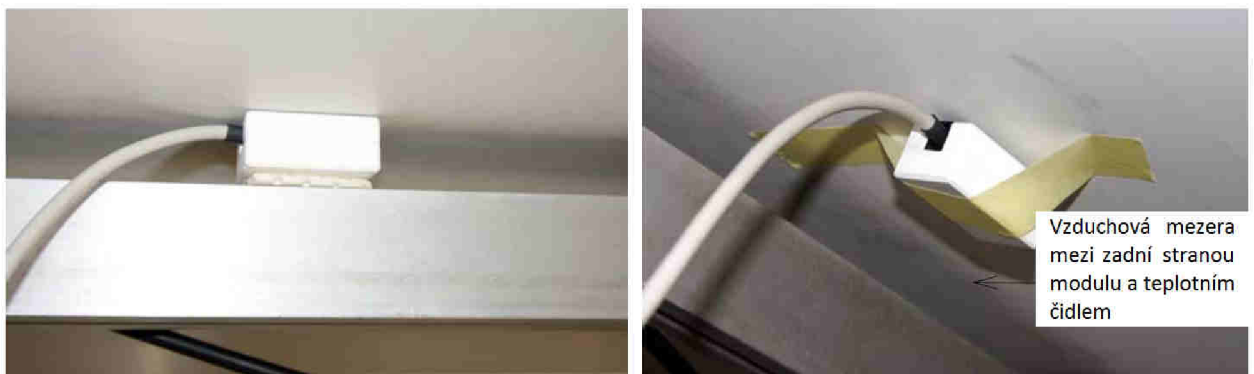


Obr. 4.3-1 Příklad správného a chybného umístění snímače ozáření [35]

4.3.3.7 Chyba teplotního čidla

Vliv chyby měření teploty je asi 1%/°C. Přesnost teplotního čidla bývá obvykle lepší než 1°C.

Mnohem vyšší chyba měření nastane, pokud není teplotní čidlo na FV modulu vhodně umístěno. Teplotní čidlo musí mít dobrý teplený kontakt s povrchem modulu. Všechny části vystavené na vzduchu musí být dobře izolovány, viz Obr. 4.3-2. [35]



Obr. 4.3-2 Příklad správného a chybného umístění teplotního čidla [35]

4.4 Účel kontroly a diagnostiky FVE

Kontrola a diagnostika FVE se provádí vždy za různým účelem, z tohoto hlediska rozeznáváme základní tři typy:

4.4.1 Kontrola a testování při uvádění FVE do provozu

Norma ČSN EN 62446 definuje minimální požadavky na obsah dokumentace, která má být předána zákazníkovi po instalaci systému připojeného na síť. Popisuje také minimální zkoušky pro uvedení do provozu, kontrolní kritéria a očekávanou dokumentaci pro ověření bezpečnosti instalace a správné fungování systému. Norma může být také použita jako podklad pro pravidelné testování správného chodu FVE.

Před uvedením FVE do provozu je zapotřebí provést kompletní kontrolu, která se týká dokumentace a skutečného provedení DC i AC části systému. Detailní postup kontroly je definován v kapitole 4.1.

Je zapotřebí podrobit FVE níže uvedeným testům a měřením, definovaným v kapitole 4.2, přičemž by se mělo postupovat v uvedeném pořadí:

1. Testování všech obvodů střídavého proudu, poté se až provádí zkoušky na DC straně
2. Ověření kontinuity ochranného zemnění či vyrovnání potenciálu, pokud jsou instalovány
3. Test polarity
4. Měření stringového napětí naprázdno
5. Měření stringového zkratového proudu
6. Ověření funkčnosti systému
7. Měření izolačního odporu DC obvodů

Po ukončení kontroly a testování musí být vytvořena příslušná výstupní zpráva, jejíž obsah je definován v kapitole 4.2.13.

4.4.2 Pravidelná kontrola a diagnostika FVE

Pravidelné kontrola a diagnostika se provádí za účelem ověření správné funkce FV systému a lze při ní užít stejné postupy jako při uvádění FVE do provozu. Pro získání přesnějších údajů o stavu systému je vhodné zkontrolovat FVE pomocí termokamery a také provést tzv. provozní zkoušku, která spočívá v měření aktuálních hodnot napětí a proudu, jejich přepočtu na STC a porovnání s nominálními hodnotami. Při detekci poškozené či nesprávně fungující části systému, je zapotřebí tuto část podrobit pokročilejším diagnostickým metodám, mezi něž patří měření V-A charakteristik, které je popsáno v kapitole 5.2.8. V případě vadných modulů, lze tyto moduly podrobit laboratorním testům, kterými se však v této práci zabývat nebudeme.

4.4.3 Kontrola a diagnostika FVE za účelem zvýšení výkonnosti či optimalizace parametrů

V případě, že FVE nevyrobí požadované množství elektrické energie, monitorovací systém vykazuje značné odchylky od předpokládané výroby či některá část FV systému nepracuje správně, je zapotřebí podrobit FV systém důkladné kontrole a diagnostice, při níž lze užít všechny výše zmíněné postupy, nejčastěji se provádí kontrola pomocí termo-kamery, měření a kontrola elektrických parametrů FV systému vč. tvaru zjištěných V-A charakteristik a také měření výkonnosti.

5 PRAKTICKÉ MĚŘENÍ A DIAGNOSTIKA

5.1 Ověření vlivu defektů FV generátorů na tvar jejich V-A charakteristiky

V této části se budeme zabývat vlivem negativních faktorů, mezi které patří např. znečištění, zastínění a další, a defektů FV generátorů na tvar jejich V-A charakteristik.

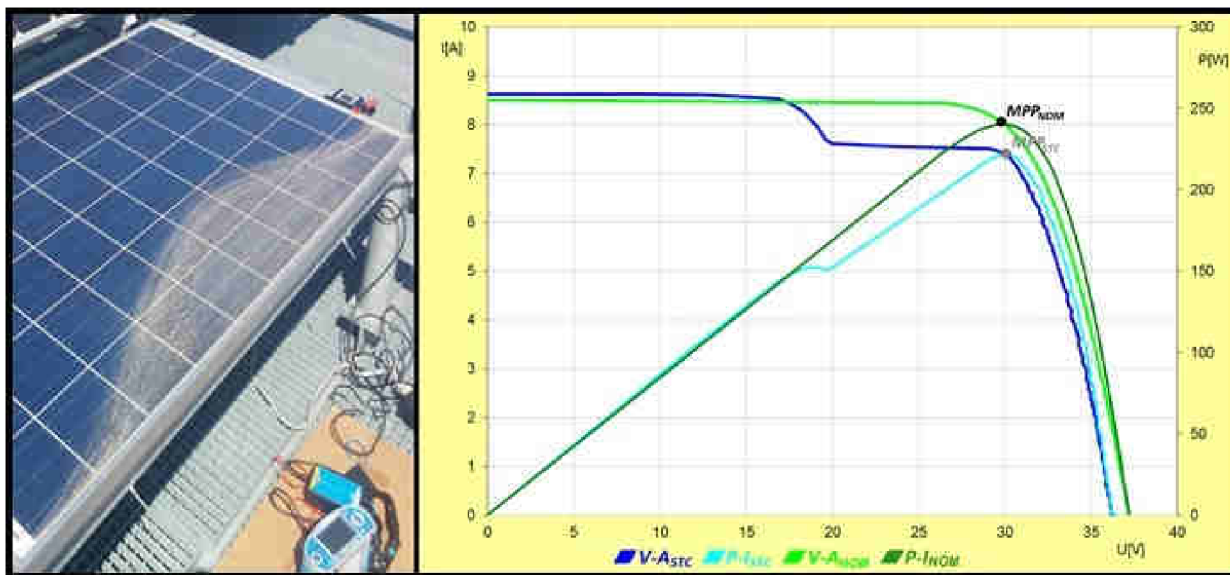
5.1.1 Vliv znečištění

Rovnoměrné znečištění se projevuje poklesem generovaného proudu FV generátoru, protože snižuje intenzitu dopadajícího záření, tak jak je uvedeno na Obr. 5.2-6 v kapitole 5.2.12. Pro praktické ověření vlivu znečištění byl vybrán polykrystalický FV modul SolarWatt 60P se základními parametry uvedenými v tabulce.

P_{MPP} [W]	U_{MPP} [V]	I_{MPP} [A]	U_{oc} [V]	I_{sc} [A]
240,00	29,90	8,03	37,20	8,50

Tab. 5.1-1 Základní parametry FV modulu SolarWatt 60P

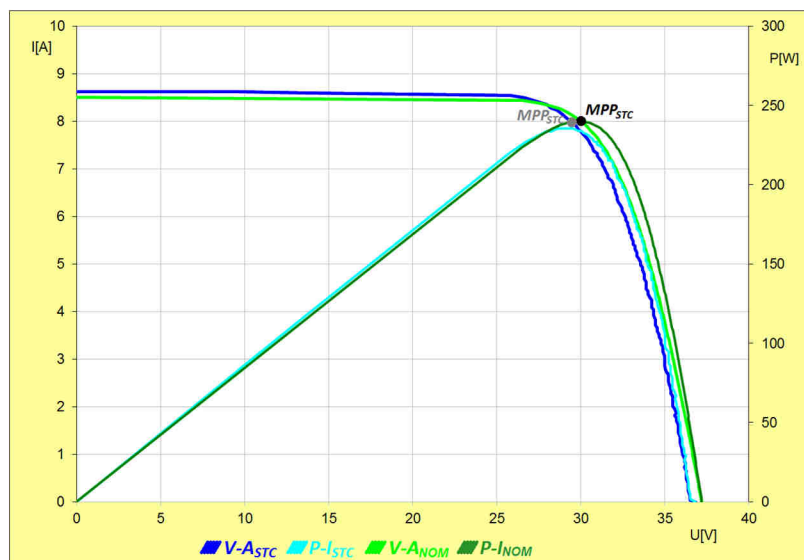
Vzhledem k vodorovnému uložení FV modulu, tj. se sklonem 0° , dochází k usazování prachových částic a nečistot u paty panelu, jak lze vidět na Obr. 5.1-1, které způsobuje částečné zastínění FV článků v daném by-pass sektoru, čímž dochází k poklesu jimi generovaného proudu a tím i k poklesu výkonu celého modulu, v tomto případě o 7,2% na 223W oproti jmenovitému výkonu a V-A charakteristika má schodovitý tvar.



Obr. 5.1-1 Vliv znečištění FV modulu na tvar V-A charakteristiky

Z Obr. 5.1-1 je také patrné, že zjištěný zkratový proud modulu je vyšší než jmenovitý, což může souviset s chybou měření intenzity záření a proudu, ale také se stárnutím panelu, které způsobuje změnu teplotních koeficientů, vlivem materiálových změn. Změřené napětí naprázdno je nižší než jmenovité, což je způsobeno úbytkem napětí na by-pass diodě, poklesem napětí na poškozených článcích a souvisí se zmíněným stárnutím modulu a chybou měření teploty a napětí.

Pro ověření správné funkce daného FV modulu, byl jeho aktivní povrch vyčištěn a bylo znovu provedeno měření V-A charakteristiky, která je zobrazena na Obr. 5.1-2.



Obr. 5.1-2 V-A charakteristika čistého FV modulu SolarWatt 60P

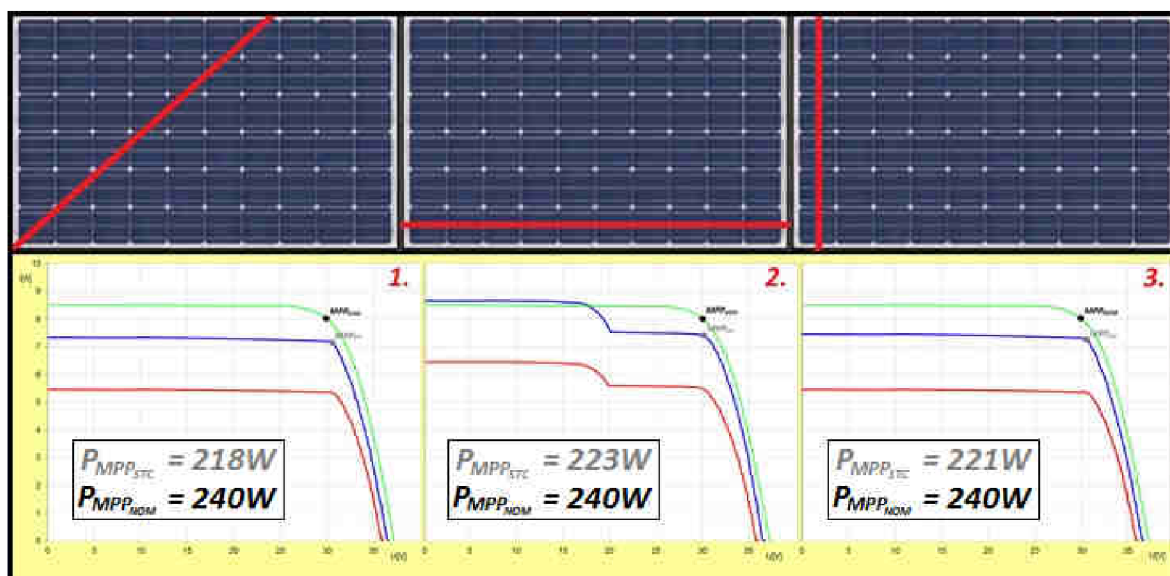
Z průběhu naměřené charakteristiky je patrné, že není zatížena žádnými anomáliemi a FV modul lze považovat za plně funkční, protože zjištěný výkon 235,6W se od jmenovitého výkonu liší o pouze 1,8%, což může být způsobeno chybou měření, ale vzhledem k velikosti změřeného proudu nakrátko a napětí naprázdno je nejpravděpodobnější příčinou materiálová degradace, která způsobuje změnu elektrických parametrů, a také teplotních koeficientů FV modulu, které se používají pro přepočítání naměřených hodnot na hodnoty STC.

Z výše uvedeného vyplývá, že před každým měřením a diagnostikou FV systému je vhodné FV moduly vyčistit, aby případné znečištění neovlivňovalo naměřená data. Čištění povrchu modulů je vhodné provádět také pravidelně, aby se předešlo zbytečným výkonovým ztrátám.

5.1.2 Vliv zastínění

Pro ověření vlivu různých typů zastínění byl použit výše uvedený modul **SolarWatt 60P**, jehož zjištěná V-A charakteristika je uvedena na Obr. 5.1-2.

Nejdříve byl ověřován vliv částečného zastínění blízkým předmětem, kterým může být anténní stožár, jímací tyč a další, vliv zastínění přes různý počet článků je uveden na Obr. 5.1-3.

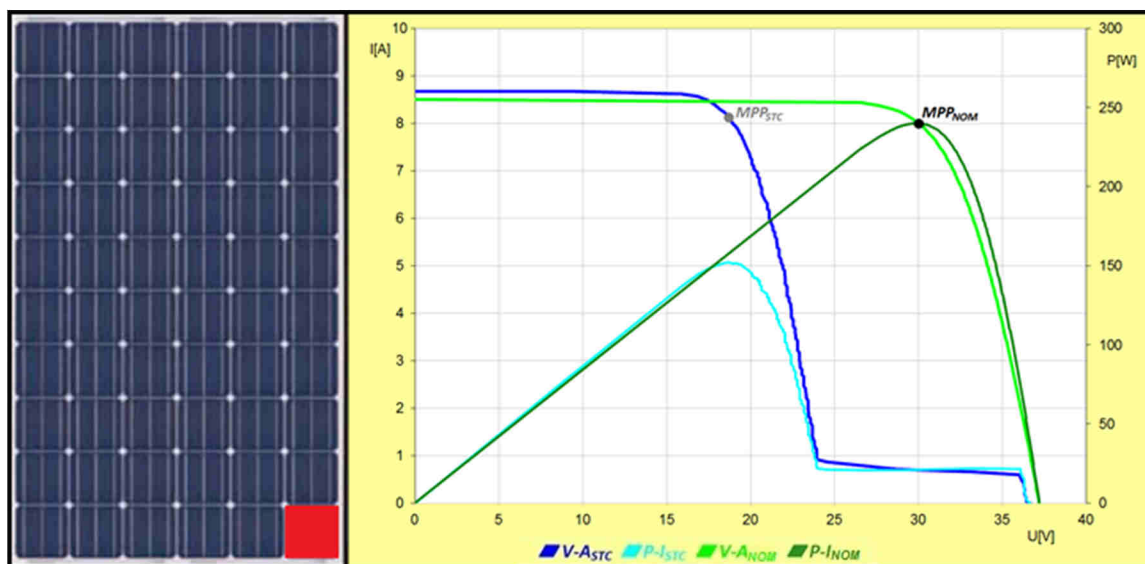


Obr. 5.1-3 Vliv přímkového zastínění na tvar V-A charakteristiky

Jak lze pozorovat přímkové zastínění způsobuje pokles výkonu FV modulu od 7 do 10% oproti jmenovité hodnotě. V 1. a 3. případě se jedná o rovnoměrný pokles generovaného proudu celého modulu, protože zastínění zasahuje do všech tří by-pass sektorů daného FV-modulu rovnoměrně, s generovaným proudem klesá i zkratový proud modulu. Ve druhém případě dochází k zastínění a poklesu výkonu článků pouze v jednom by-pass sektoru, na což zareaguje pouze dioda příslušného sektoru, která se vlivem sníženého napětí zastíněných článků částečně otevře, celkový zkratový proud modulu se nezmění a V-A charakteristika má schodovitý tvar. Opět lze zde pozorovat vliv materiálové degradace. Tento způsob zastínění je nejběžněji se vyskytujícím jevem ve FV systémech umístěných na střechách objektů, protože většina objektů je vybavena ochranou před bleskem, jehož nedílnou součástí jsou právě jímací tyče.

Dále byl ověřován vliv úplného zastínění jednotlivých článků, oproti předchozímu, kdy na zastíněné části FV článků dopadalo, alespoň difuzní záření, v tomto případě na zastíněné části nedopadá žádné záření.

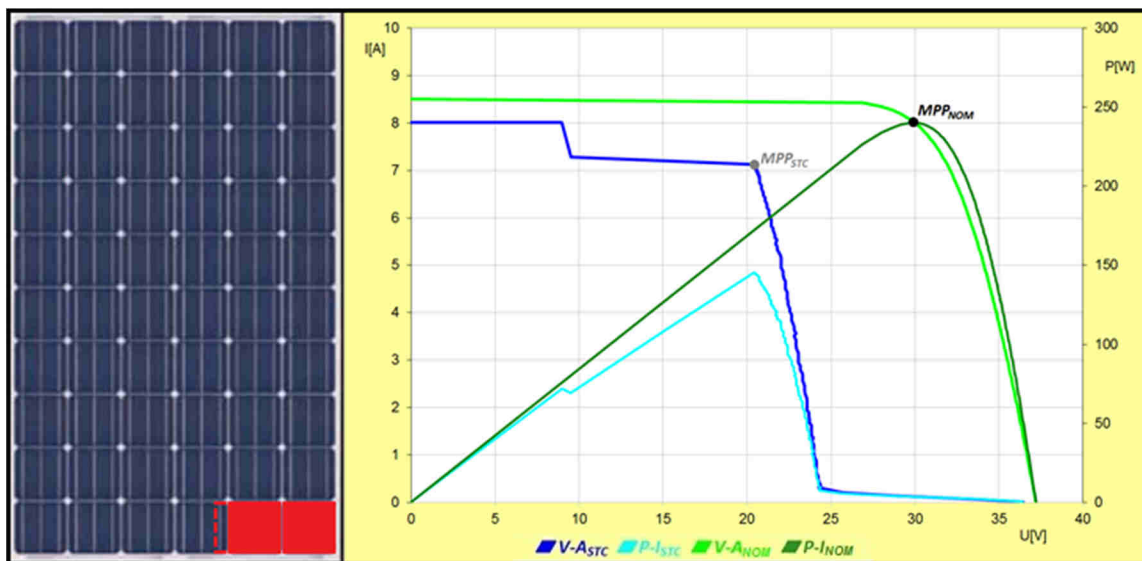
Na obr. 5.1-4 je zobrazen vliv úplného zastínění jednoho FV článku na tvar V-A charakteristiky a výkon daného FV modulu



Obr. 5.1-4 Vliv úplného zastínění jednoho FV článku

Z naměřené charakteristiky lze vyvodit, že při úplném zastínění jednoho FV článku, tento článek přechází do inverzního chodu, tj. stává se spotřebičem, dochází ke změně napěťových poměrů v postiženém by-pass sektoru, protože na zastíněném článku dochází ke změně polarity napětí, na což zareaguje příslušná dioda a přemostí daný sektor, kterým protéká pouze zbytkový proud. Výkon FV modulu se sníží na o 36% na 154W oproti jmenovitému výkonu, tzn. o zhruba třetinu výkonu, protože daný modul je vybaven třemi by-pass diodami, které jej rozdělují na tři sektory.

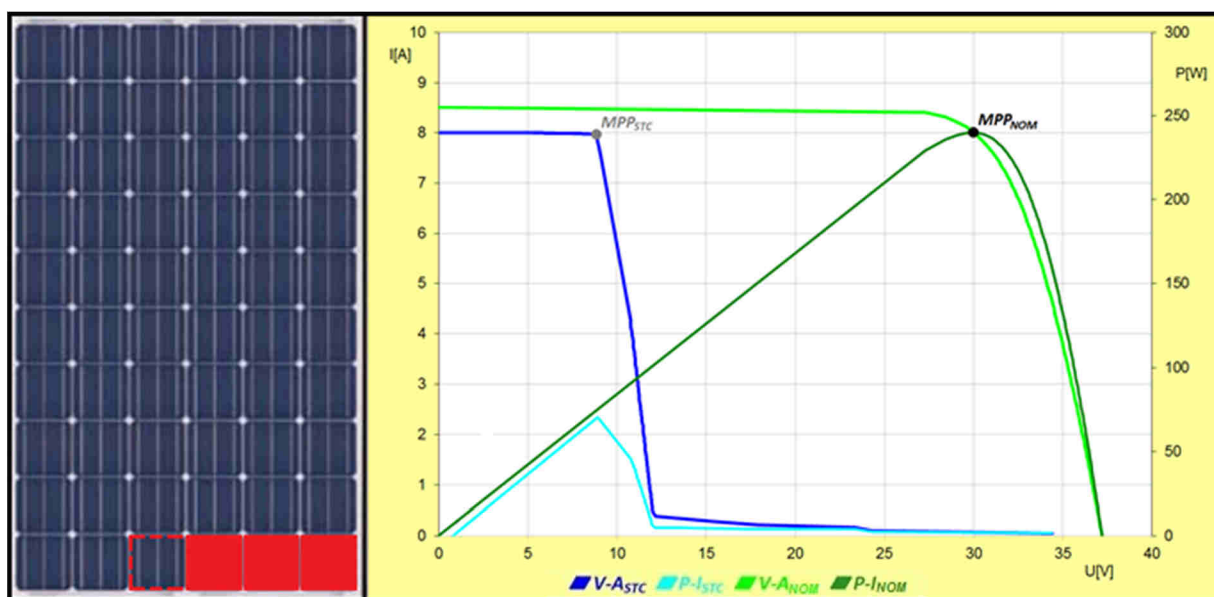
Následující Obr. 5.1-5 zobrazuje vliv úplného zastínění dvou FV článků na tvar V-A charakteristiky a výkon daného FV modulu.



Obr. 5.1-5 Vliv úplného zastínění dvou FV článků

Z obrázku je patrné, že úplné zastínění dvou FV článků se projevuje podobným způsobem jako zastínění jednoho článku, protože jsou součástí stejného by-pass sektoru. Jak si však lze všimnout příspěvek zkratovaného sektoru je minimální, protože veškerý zbytkový proud je spotřebován zastíněnými články. Zastínění článků trvalo několik desítek sekund, došlo k jejich zahřátí, které ovlivnilo i okolní články, na nichž došlo vlivem poklesu napětí k částečnému otevření překlenovací diody a poklesu generovaného proudu, pro potvrzení tohoto tvrzení by byl zapotřebí termografický snímek panelu. Dalším možnou příčinou je, že použitá překážka mohla překrývat i část FV článku v dalším sektoru nebo se během měření vyskytl na aktivním povrchu náhodný stín, který způsobil pokles generovaného proudu druhého sektoru. Výkon FV modulu poklesl o 40% na 145W oproti jmenovitému, snížil se také zkratový proud modulu, což může vzhledem k vnitřnímu zapojení modulu souviset s aktivací by-pass diod vlivem tepelných účinků, případně může být způsoben zmíněným náhodným stínem.

V dalším Obr. 5.1-6 je zobrazen vliv úplného zastínění tří a čtyř FV článků, které se projevilo přemostěním obou postižených by-pass sektorů.

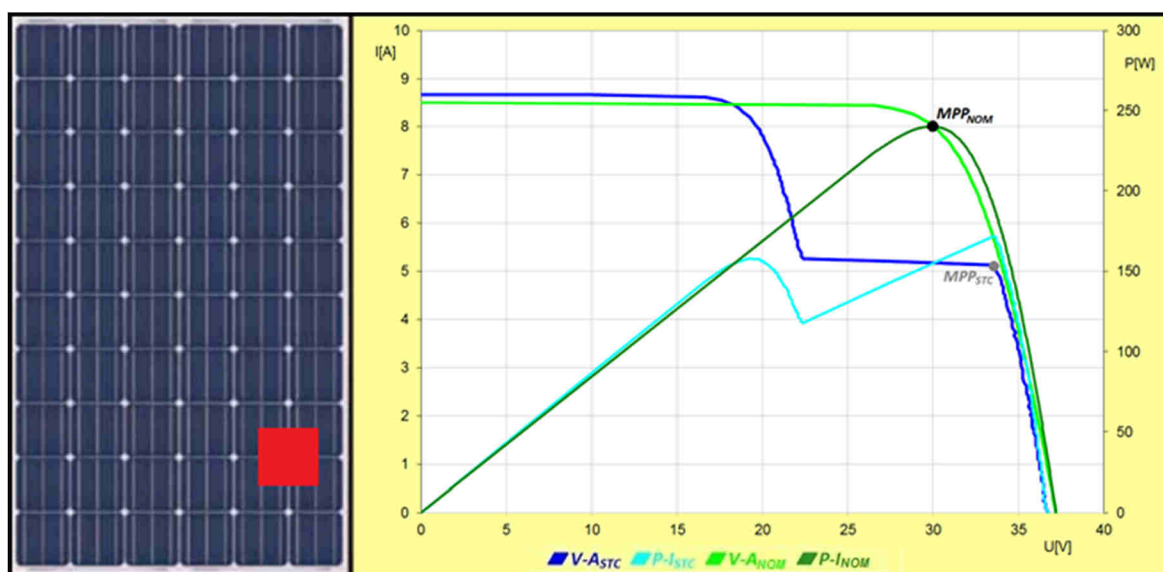


Obr. 5.1-6 Vliv úplného zastínění tří a čtyř FV článků

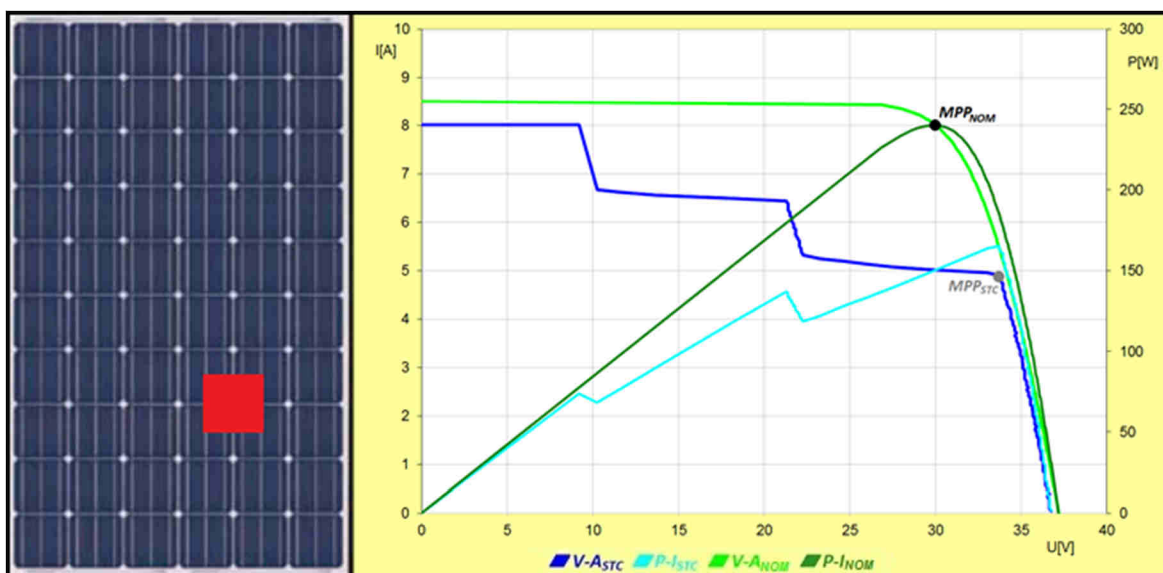
Výkon FV modulu poklesl o 70% na 71W oproti jmenovitému tzn. o zhruba dvě třetiny výkonu, o 4% větší pokles souvisí s přesností měření, materiálovou degradací a také se snížením zkratového proudu modulu, který je způsoben nadměrným zahříváním článků v obou překlenutých by-pass sektorech, protože dopadající energie záření se přeměňuje pouze na teplo, čímž je ovlivněn celý FV modul. Stejným způsobem se projeví úplné zastínění čtyř FV článků.

Při zastínění pěti, případně šesti článků dojde k aktivaci všech by-pass diod a výkon FV modulu poklesne takřka o 100%, modul dodává pouze minimální zbytkový proud.

V následujících Obr. 5.1-7 a 5.1-8 je zobrazen vliv částečného zastínění čtyř sousedících FV článků přes jeden a dva by-pass sektory.



Obr. 5.1-7 Vliv částečného zastínění čtyř FV článků v jednom by-pass sektoru



Obr. 5.1-8 Vliv částečného zastínění čtyř FV článků ve dvou by-pass sektorech

Jak lze v uvedených obrázcích pozorovat, částečné zastínění čtyř článků předmětem o kousek větším než je FV článek, nezpůsobí takový pokles výkonu, jako úplné zastínění jednoho článku. V prvním případě výkon poklesl o 28% na 172W, pokud by však zastiňující předmět byl větších rozměrů, došlo by k výraznějšímu poklesu generovaného proudu a P-I křivka by měla dvě blízká maxima, následně by MPP tracker méně kvalitního měniče mohl mít problém s nalezením

vhodného pracovního bodu, v nejhorším případě by jej vůbec nenalezl a došlo by k výpadku výroby. V druhém případě výkon poklesl o 31% na 165W, jak lze pozorovat došlo k poklesu zkratového proudu FV modulu, protože zastíněné články ovlivnili svým zahříváním celý FV modul, vzhledem k míře zastínění jednotlivých článků by mohlo na P-I křivce vzniknout více maxim, což by opět mohlo způsobovat problémy s nalezením vhodného pracovního bodu.

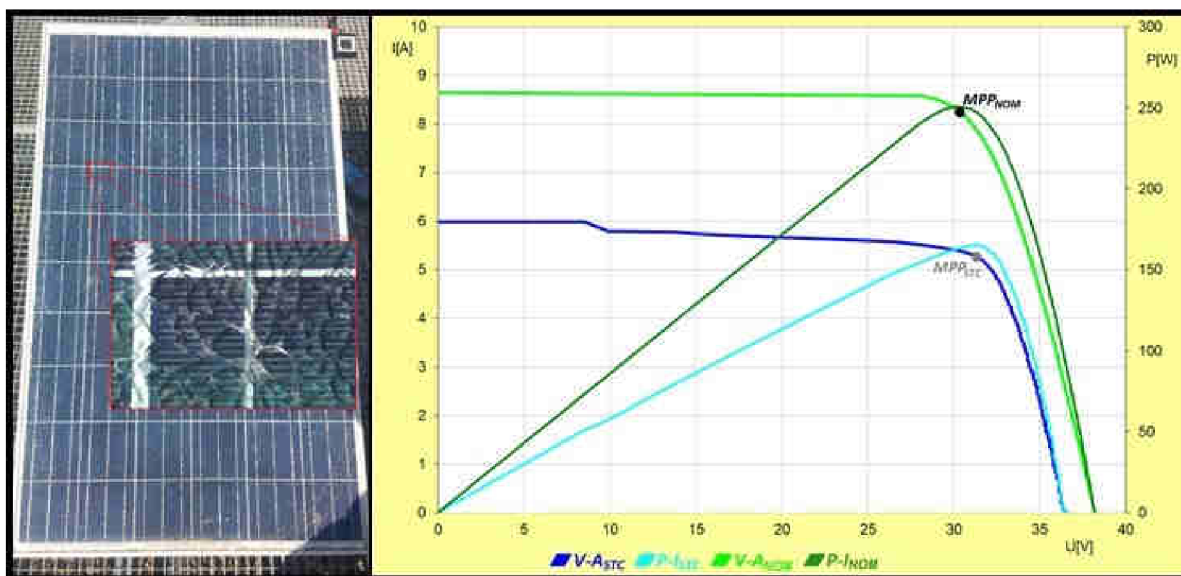
5.1.3 Vliv popraskaného krycího skla

V případě lokální praskliny, by tato prasklina snížila intenzitu dopadajícího záření v daném místě, tj. způsobila lokální zastínění, což by vedlo k poklesu generovaného proudu postižených FV článků, k jejich zahřívání a také k poklesu celkového výkonu FV modulu. Ve většině případů, protože se jedná o tvrzené sklo, však dojde k popraskání celého povrchu krycího skla, jak je tomu i v tomto případě.

P_{MPP} [W]	U_{MPP} [V]	I_{MPP} [A]	U_{oc} [V]	I_{sc} [A]
250,00	30,30	8,27	38,19	8,65

Tab. 5.1-2 Základní parametry FV modulu Conergy PH 250P

Na Obr. 5.1-9 je uveden vliv rovnoměrně popraskaného krycího skla polykrystalického FV modulu Conergy PH 250P, jehož základní parametry jsou uvedeny v Tab. 5.1-2.



Obr. 5.1-9 Vliv rovnoměrně popraskaného krycího skla na tvar V-A charakteristiky

Jak lze z uvedeného obrázku pozorovat, rovnoměrně popraskané krycí sklo se projevuje takřka stejně jako rovnoměrné znečištění aktivního povrchu modulu či stárnutí, které je uvedeno na Obr. 4.2.6 v kapitole 4.2.11, a to snížením intenzity dopadajícího záření po celém aktivním povrchu, které způsobuje pokles generovaného i zkratového proudu FV modulu, došlo také ke snížení hodnoty napětí naprázdno o pokles napětí na FV člancích a úbytek napětí na by-pass diodách, snížená hodnota napětí naprázdno může souviset taktéž se stárnutím a s tím související změnou teplotních koeficientů. Výsledný výkon FV modulu poklesl 34% na 165W ve srovnání se jmenovitou hodnotou.

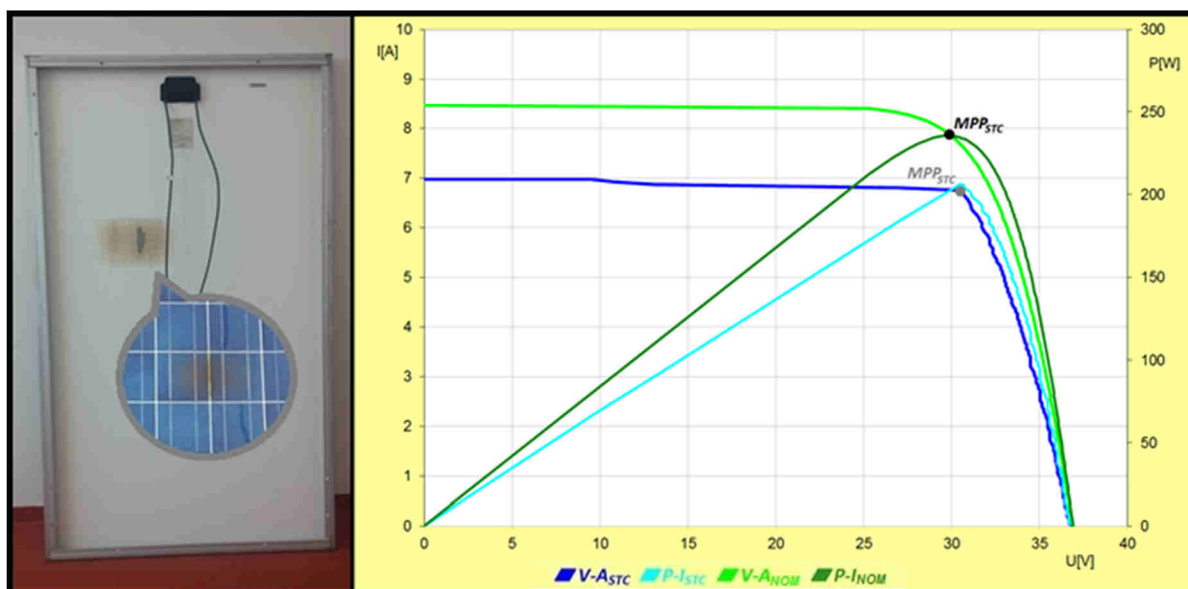
5.1.4 Vliv horkého místa neboli HOT-SPOTu

Možnými důvody vzniku horkých míst jsou lokální zastínění, zvýšený kontaktní odpor na sběrných FV článků a další, bližší informace jsou uvedeny v kapitole 2.2.5. Pokud je teplota daného článku značně vyšší než teplota ostatních článků (cca o 50°C), může dojít k trvalé destrukci FV článku a tím i celého panelu. Nejvíce nebezpečná jsou horká místa při poruše by-pass diody, která má omezit průtok proudu přes postižené články a tím zabránit jejich přehřívání.

Míru vlivu horkého místa při poškozené by-pass diodě lze pozorovat vizuálně na samotném modulu a také na tvaru jeho V-A charakteristiky, tak jak je uvedeno na Obr. 5.1-10, postiženým FV modulem je CanadianSolar 235P se základními parametry uvedenými v tabulce níže.

P_{MPP} [W]	U_{MPP} [V]	I_{MPP} [A]	U_{oc} [V]	I_{sc} [A]
235,00	29,80	7,90	36,90	8,46

Tab. 5.1-3 Základní parametry FV modulu Canadian Solar 235P



Obr. 5.1-10 Vliv horkého místa na tvar V-A charakteristiky

Jak lze pozorovat, příčinou vzniku horkého místa může být zkrat mezi dvěma sousedními FV články, horké místo se projevuje jako spotřebič, čímž snižuje velikost generovaného i zkratového proudu FV modulu. Pokles výkonu o 12% na 206W, způsobený Hot-Spotem sice není tak výrazný jako u ostatních defektů, ale je v provozu FVE neakceptovatelný, protože při dalším provozu způsobuje nadměrné zahřívání okolních článků, které způsobuje stále se zvyšující pokles generovaného proudu a také degradaci použitých materiálů.

5.2 Kontrola a diagnostika FVE T14

5.2.1 Předmět kontroly a testování

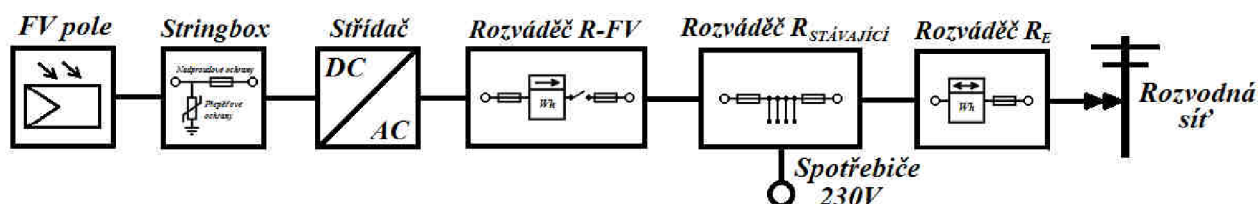
Testovaným objektem je FVE na budově T14 fakulty Elektrotechniky VUT v Brně. Elektrárna vyrábí pro vlastní spotřebu VUT a přebytky dodává do lokální distribuční sítě. Cílem je provedení kontroly, provozního měření a diagnostiky této elektrárny za účelem ověření správné funkčnosti elektrárny, odhalení případných defektů a návrh vhodných opatření pro optimalizaci provozu. Při kontrole a měření se bude vycházet z projektové dokumentace tohoto objektu a také z revizní zprávy vypracované v souvislosti s uvedením FVE do provozu.

5.2.2 Popis objektu

Přípojení ke stávající elektroinstalaci je provedeno kabelem CYKY-J 5x6mm² z rozvaděče R-FV na hlavní vypínač SCHRACK 40A/3. V hlavním rozvaděči R-FV, umístěném na stěně technické místnosti, je obsaženo hlavní jištění, přepěťové ochrany, jištění pro střídač, blokovací ochrana a měření výroby, které je zajištěno pomocí elektroměru. V případě nežádoucího vlivu výroby, blokovací ochrana zajistí odepnutí výroby od distribuce vybavením silového stykače.

Vedení k výstupním svorkám střídače je provedeno kabelem typu CYKY-J 5x6mm². Střídač je od výrobce Sunways typu NT 10000 s výstupním AC výkonem 10kW. Ve střídači dochází k přeměně sítě DC IT 2-800V na AC 230V, 50Hz TNC. Přívody ke vstupním svorkám střídače jsou provedeny kabely typu PVE 1-F 1x6mm² z výstupních svorek stringboxu označeného DC Stringbox, který obsahuje přepěťové ochrany a pojistkové odpínače jednotlivých přívodů od solárních modulů, jež jsou provedeny taktéž kabely typu PVE 1-F 1x6mm². Solární pole je tvořeno třemi stingy po patnácti solárních modulech typu Fire Energy 240P s celkovým instalovaným špičkovým výkonem 10,8kWp, moduly jsou instalovány na nosných konstrukcích pod úlem 28° s orientací na jih. Velikost napětí na DC smyčkách se během provozu pohybuje v rozsahu cca 400 až 550V. Ochranné pospojování je provedeno pomocí propojovacího vodiče typu CYA 1x25mm² ZŽ a je zakončené na EPS. Hlavní kabelové trasy v solárním poli jsou umístěny v kabelových žlabech. Snímek FV pole a také půdorys FVE s označením jednotlivých stringů a modulů jsou uvedeny v příloze.

5.2.3 Blokové schéma FVE T14



Obr. 5.2-1 Blokové schéma FVE T14

5.2.4 Parametry použitých FV modulů

V tabulce níže jsou uvedeny specifické parametry FV modulu Fire Energy 240P, deklarované výrobcem v katalogovém listu, které budou použity pro srovnání s naměřenými hodnotami.

P _{MPP} [W]	U _{MPP} [V]	I _{MPP} [A]	U _{oc} [V]	I _{sc} [A]	NOCT [°C]	α [mA/°C]	β [V/°C]	Gama [%/°C]	η (%)
240,00	30,50	8,00	36,6	8,96	47,00	3,58	-0,121	-0,47	14,66

Tab. 5.2-1 Parametry FV modulu Fire Energy 240P

5.2.5 Kontrola dokumentace, skutečného provedení a vizuální kontrola

Nejdříve byla provedena kontrola dokumentace. Předložená systémová dokumentace splňovala všechna kritéria definovaná v ČSN EN 62446, ovšem z přístrojové dokumentace nebyl předložen jediný požadovaný dokument, proto bylo zapotřebí katalogový list FV modulů a použitého střídače dohledat dle výrobních čísel pomocí internetu, což považuji za výrazný problém, protože výrobci katalogové listy jednotlivých prvků systému postupem času mění, protože se mění i technologie výroby, a získání odpovídajících dokumentů může být u starších FV prvků obtížné, v některých případech i nemožné. Předložené schéma zapojení odpovídalo skutečnému provedení, vyjma stringboxu, který není součástí FV pole, ale je umístěn v technické místnosti pod hlavním rozváděčem R-FV, v této místnosti je umístěn taktéž střídač a elektroměrový rozváděč. Další dokumenty požadované výše uvedenou normou předloženy nebyly.

Skutečné provedení DC a AC části systému, zcela odpovídá požadavkům ČSN 332000-7-712, jediným možným problémem by v budoucnu mohla být méně kvalitní izolace vodičů ve FV poli, která již působením povětrnostních vlivů vybledla a ztratila svoji pevnost, ale provedené testy neodhalily žádnou funkční vadu. Byla také provedena kontrola instalace FV modulů na nosných, přičemž bylo ověřeno, že FV moduly jsou instalovány pod úhlem přibližně 28° s orientací na jih a rozestupy mezi jednotlivými řadami jsou 165cm, což odpovídá dokumentaci, Ideální sklon FV panelů pro lokalitu FVE je dle internetového portálu PVGIS udávaný 34° , avšak rozdíl 6° výkon FVE ovlivní zcela nepatrně.

Vizuální kontrola celého systému odhalila značné množství volně visících konektorů, u kterých hrozí jejich rozpojení, viz fotografická dokumentace v příloze, také bylo nalezeno několik nedotažených kabelových spojů, u nichž dochází vlivem zvýšení přechodového odporu k výkonovým ztrátám a následnému nárůstu teploty, která by mohla způsobit poškození daného spoje, případně by mohlo dojít k jejich rozpojení a tím k výpadku celého systému.

Na sedmi FV modulech byla detekována LID neboli světlem indukovaná degradace projevující se zažloutnutím aktivního povrchu. U těchto modulů byla provedena podrobnější diagnostika pro ověření vlivu LID na jejich výkon.

Za závažný problém považuji umístění čidla klimatizace na nosnou konstrukci v těsné blízkosti FV modulu, jak je uvedeno fotografií v příloze. Toto čidlo jej v odpoledních hodinách zastíňuje přes všechny by-sektory, což vede k poklesu generovaného proudu FV článků, zbylé moduly ve strigu tudíž generují vyšší proud, který prochází přes zastíněný modul a způsobuje jeho zahřívání, čímž se snižuje napětí článků a dojde k zapůsobení překlenovacích diod, které zastíněný modul zcela odpojí. Napětí stringu poklesne o napětí překlenutého modulu, při uvažování jmenovitých hodnot klesne napětí v bodě maximálního výkonu stringu z 457,5V na 427V, což způsobí pokles výkonu o 6,7% viz příloha.

Kromě výše uvedených, nebyly během kontroly FV systému zaznamenány žádné další nedostatky nebo viditelná poškození FV modulů, nosných konstrukcí či kabeláže a následovalo měření a diagnostika elektrických parametrů FV systému.

5.2.6 Měření a diagnostika FV systému

Pro měření a diagnostiku FV systému byl použit přístroj METREL MI 3108 Eutrotest PV s jednotkou A 1378 pro měření intenzity záření a teploty FV modulů, která umožňuje časovou synchronizaci naměřených dat. Naměřená data byla vyhodnocena pomocí softwarového nástroje EuroLink PRO taktéž od společnosti METREL. Termografické snímky FV modulů byly pořízeny termovizní kamerou FLIR SC640.

Při vyhodnocení naměřených hodnot, musí být také zohledněna chyba měření uvedených měřicích zařízení, přičemž při měření izolačního odporu dosahuje až $\pm 5\%$, při měření V-A charakteristik je udávána maximální chyba napětí a proudu $\pm 2\%$, chyba měření teploty a ozáření jednotkou A 1378 je pro obojí $\pm 1\%$ a při měření teploty termovizní kamerou $\pm 2\%$. Z výše uvedeného vyplývá, že celková chyba měření výkonu FV generátoru může dosahovat až 5% a výkon FV modulů je výrobcem udáván s tolerancí $\pm 3\%$. Vzhledem k uvedeným chybám měření, přesnosti jmenovitých hodnot FV modulů udávaných výrobcem a přirozené degradaci FV článků, bude při vyhodnocení uvažována 5% únosná odchylka změřených hodnot oproti jmenovitým hodnotám, která je též definována v příslušné legislativě.

Měření izolačního odporu

Vzhledem k zjištěné degradaci izolace vodičů, bylo nejdříve nutné provést měření izolačního odporu FV stringů. Při měření musely být odpojeny přepěťové ochrany, aby neovlivňovaly výsledky měření, které jsou uvedeny v Tab. 5.2-2 níže. Pro měření byla zvolena testovací metoda č.1 s testovacím napětím 1000V, kvůli velikosti systémového napětí převyšuje 500V. Nejdříve byl změřen izolační odpor mezi záporným pólem stringu a zemí, následně kladným pólem a zemí.

	String 1	String 2	String 3
$R_{ISO+} [M\Omega]$	122,9	101,8	122,4
$R_{ISO-} [M\Omega]$	62,2	51,6	63,8

Tab. 5.2-2 Změřené hodnoty izolačního odporu FV stringů

$$R_{ISO,min} = \frac{40M\Omega \cdot m^2}{n \cdot S_{modul}} = \frac{40M\Omega \cdot m^2}{15 \cdot 1,637m^2} = \mathbf{1,623M\Omega} \quad (17)$$

, kde n je počet modulů ve stringu a S_{modul} plocha jednoho FV modulu.

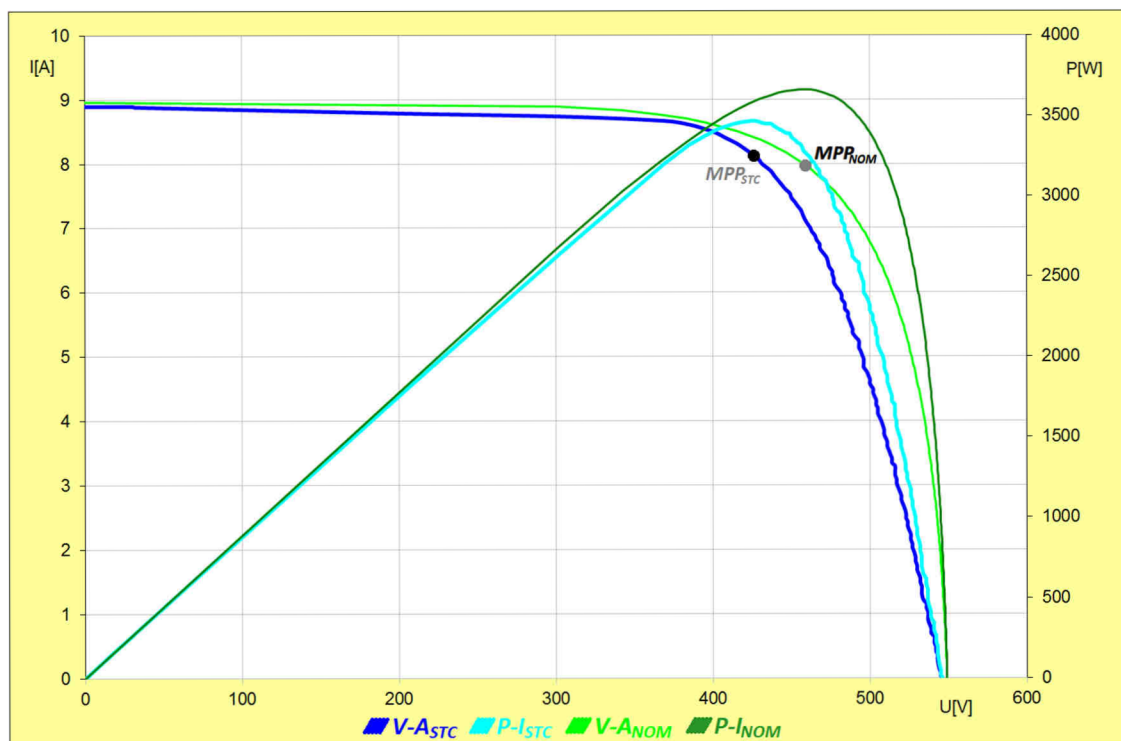
Z uvedených výsledků je patrné, že druhý string vykazoval nižší hodnoty izolačního odporu, což může souviset se zmíněnou degradací izolace vodičů nebo se sníženou izolační schopností FV panelů. Ovšem změřené hodnoty jsou mnohonásobně vyšší než legislativně definovaná minimální hodnota izolačního odporu, proto je lze považovat za vyhovující a není zapotřebí další testování.

Měření V-A charakteristik

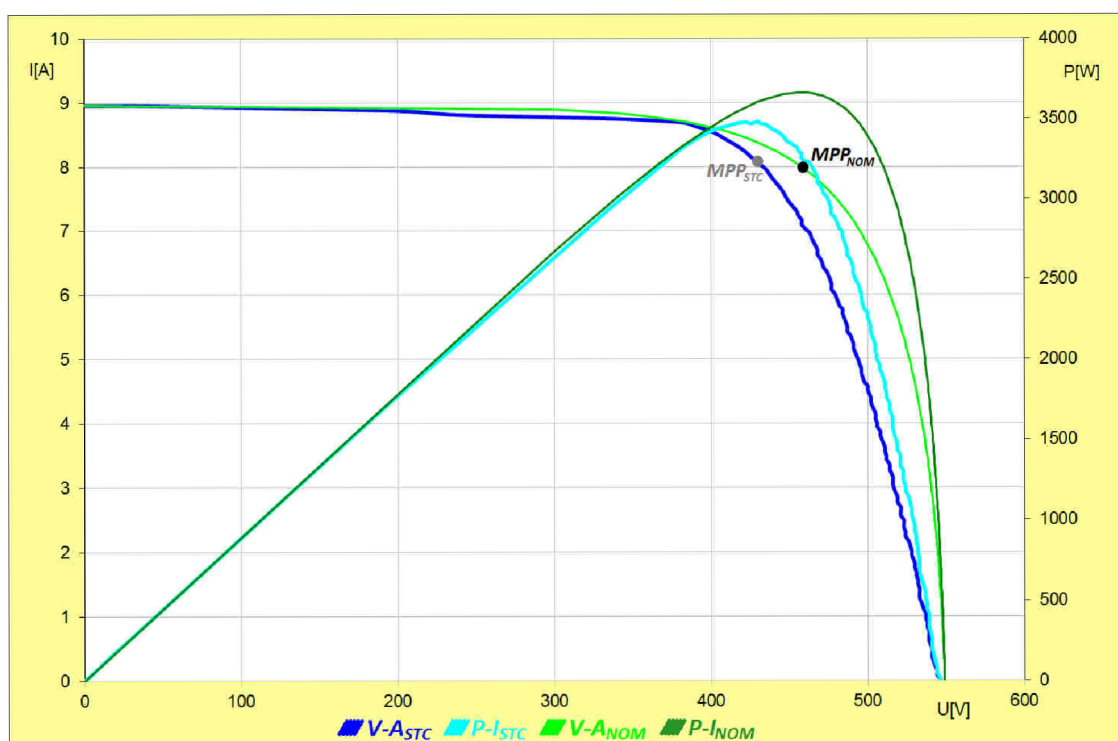
Jelikož byly FV stringy odpojeny od měniče při měření izolačního odporu, následovalo měření V-A charakteristik jednotlivých stringů, jejichž průběhy jsou uvedeny na Obr. 5.2-2 až 5.2-4. Charakteristické hodnoty jednotlivých křivek jsou uvedeny v Tab. 5.2-3.

Z níže uvedených V-A charakteristik je patrné, že nejsou zatíženy žádnými defekty, uvedenými v kapitole 5.1, které by výrazně ovlivňovaly jejich tvar, nelze ani pozorovat výrazný vliv FV modulů zasažených LID, které se převážně nacházejí ve druhém stringu, což je ovšem zřetelné, je výrazný odklon „vertikální“ části charakteristiky od nominálu, který způsobuje značný pokles napětí v bodě maximálního výkonu, což vede ke snížení výkonu FV stringu. Tento odklon je

však u všech tří charakteristik stejný, což může naznačovat zvýšený sériový odpor ve stringu, způsobený přídavnými ztrátami na vedení a kontaktech, poddimenzované vodiče, plošnou materiálovou degradaci FV modulů či rozdílné složení spektra testovacího záření, proto bylo zapotřebí provést důkladnější diagnostiku, pro odhalení skutečné příčiny.

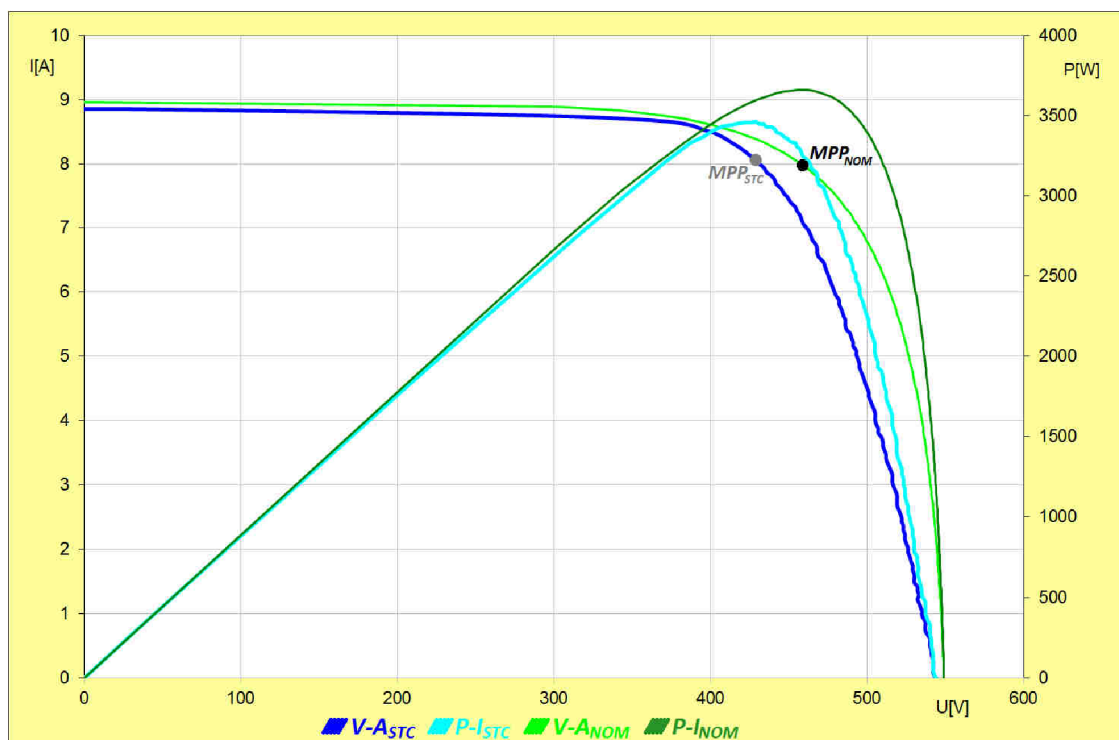


Obr. 5.2-2 V-A charakteristika FV stringu č.1



Obr. 5.2-3 V-A charakteristika FV stringu č.2

Propad či mírná nerovnost V-A charakteristiky druhé stringu v oblasti konstantního proudu je nejspíše způsobena změnou intenzity záření během měření, případně chybou měření.



Obr. 5.2-4 V-A charakteristika FV stringu č.3

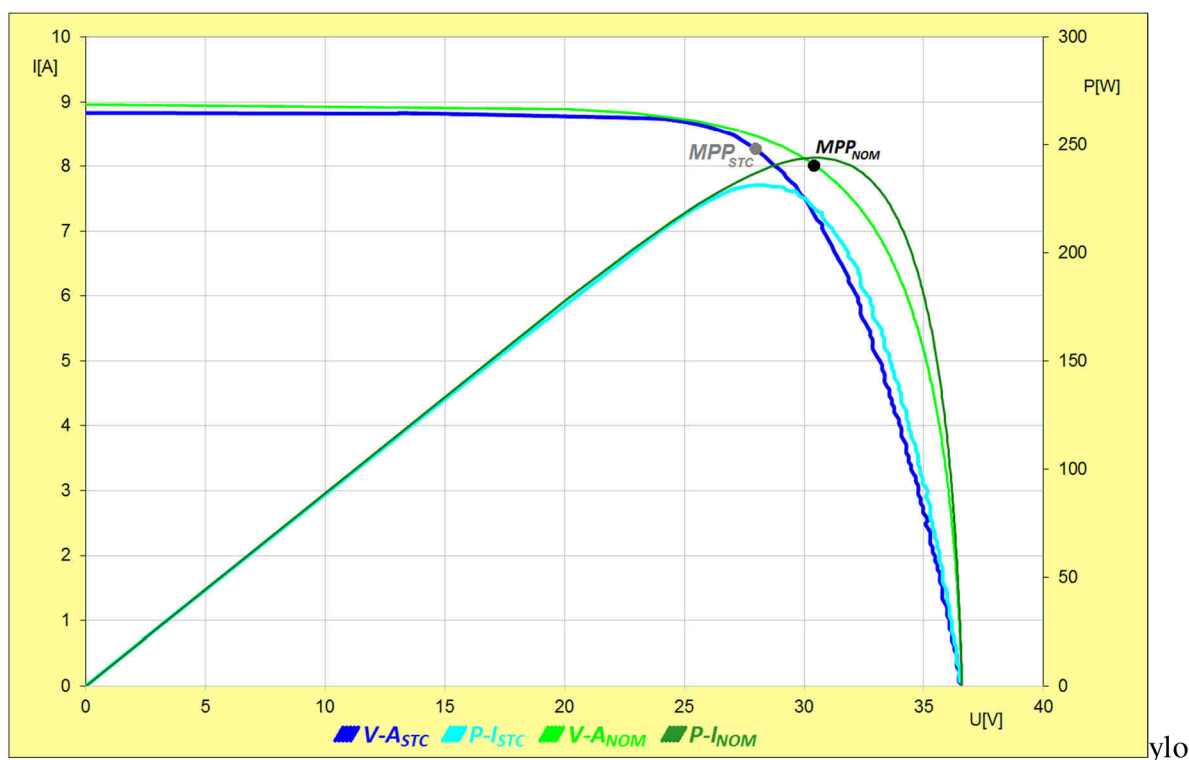
	String 1		String 2		String 3		Jmenovité hodnoty
	STC	Odchylka	STC	Odchylka	STC	Odchylka	
U_{OC} [V]	545,79	-0,6%	545,91	-0,6%	544,04	-0,9%	549,00
I_{SC} [A]	8,89	-0,8%	8,96	±0,0%	8,85	-1,2%	8,96
U_{MPP} [V]	426,20	-6,8%	430,10	-6,0%	429,00	-6,2%	457,50
I_{MPP} [A]	8,13	+1,6%	8,09	+1,1%	8,07	+0,9%	8,00
P_{MPP} [W]	3464,90	-3,8%	3479,20	-3,4%	3462,10	-3,8%	3600

Tab. 5.2-3 Elektrické parametry FV stringů odečtené z měřených V-A charakteristik

Z hodnot uvedených v Tab. 5.2-3 je patrné, že výše zmíněný odklon charakteristik způsobuje snížení napětí v bodě MPP o 6 až 7%, což se ve výsledku projeví snížením výkonu FV stringu o 3,4-3,8%. Odchylky napětí naprázdno nepřesahují 2% a odchylky proudu nakrátko 1%, přičemž hranice dovoleného poklesu je 5%, proto je vzhledem k chybě měření lze považovat za vyhovující, možným důvodem poklesu jejich hodnot by mohla být zmíněná materiálová degradace, která také způsobuje změnu teplotních koeficientů.

Pro zjištění příčiny zmíněného odklonu V-A charakteristik stringů byly vybrány některé FV moduly ze všech tří stringů a bylo u nich provedeno ověřovací měření.

Na Obr. 5.2-5 je V-A charakteristika jednoho z testovaných FV panelů, konkrétně panelu č.15 z 1. stringu, z jejíhož průběhu je patrné, že má takřka totožný tvar jako výše uvedené V-A charakteristiky jednotlivých strigů, stejně tomu bylo i u zbylých testovaných panelů, jejichž V-A charakteristiky jsou uvedeny v příloze. Na základě těchto zjištění, lze jako příčinu odklonu charakteristiky vyloučit poddimenzované vodiče, což bylo ověřeno i při provádění revize při uvádění FVE do provozu, stejně tak lze vyloučit přídatné ztráty na vedení a kontaktech a za příčinu nelze považovat ani vliv rozdílného testovacího spektra, protože měření bylo prováděno v jiný den než měření V-A charakteristik stringů a se zcela jasnou oblohou. Možnou příčinou mohl být i zvýšený přechodový odpor v připojovacích boxech či konektorech FV modulů, což ovšem bylo vyloučeno termovizním měření, které bude uvedeno níže a při kterém nebylo odhaleno znatelné zvýšení teploty propojovacích boxů ani konektorů vlivem výkonových ztrát. Proto lze za příčinu odklonu V-A charakteristiky označit vliv plošné materiálové degradace FV modulů, která způsobuje zvýšení vnitřního sériového odporu FV modulů a způsobuje pokles jejich výkonu. Pro ověření zda se jedná o degradaci propojovacích prvků, kontaktů či degradaci samotných článků by bylo zapotřebí vybrat některé moduly a podrobit je důkladnějšímu laboratornímu testování.



Obr. 5.2-5 V-A charakteristika FV panelu č.15 ve stringu č.1

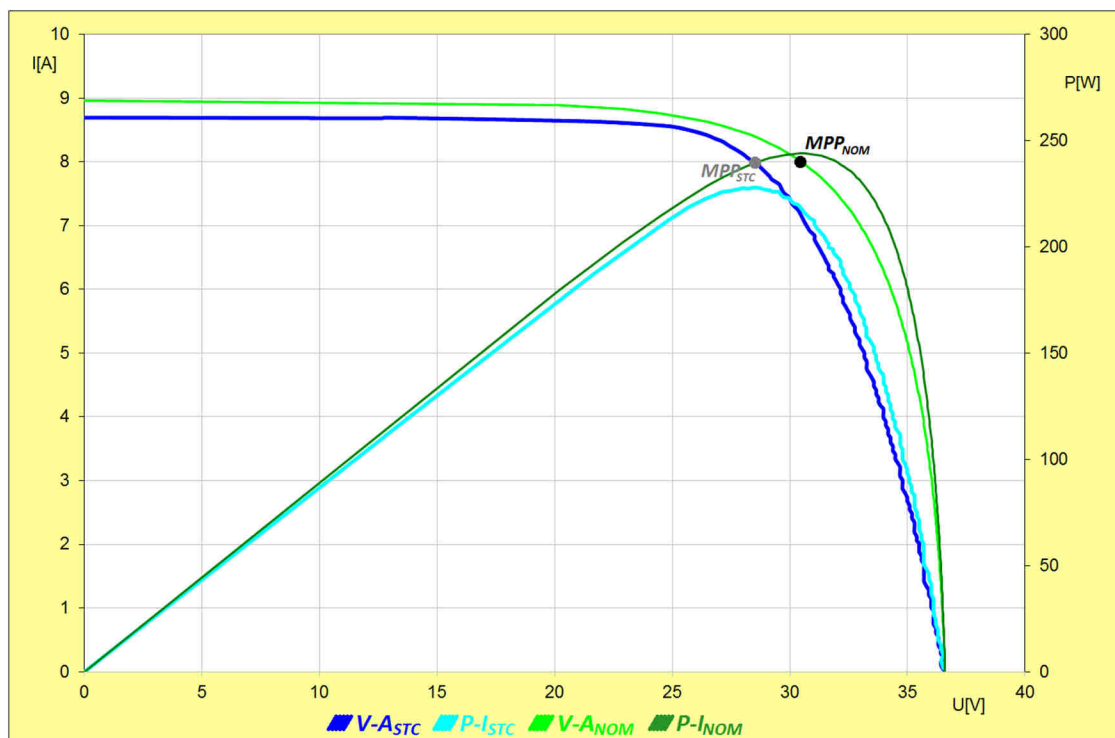
Odchytky napětí naprázdno a proudu nakrátko u testovaných modulů nepřesahují 2%, odchylka napětí v bodě MPP se pohybuje mezi 6 a 7%, s čím souvisí pokles výkonu o 3-4%. Výrobce uvádí hodnotu jmenovitého výkonu FV modulů s přesností $\pm 3\%$ a garantuje jeho pokles o maximálně 1% za rok, což by po čtyřletém provozu FVE elektrárny odpovídalo zjištěné odchylce, přičemž musíme také brát v potaz možnou chybu měření. Pro ověření zda je FV pole opravdu v pořádku bylo nutné provést ověřovací měření u FV modulů zasažených LID a také důkladně zkontrolovat celou FVE pomocí termovizní kamery.

Ověření vlivu LID

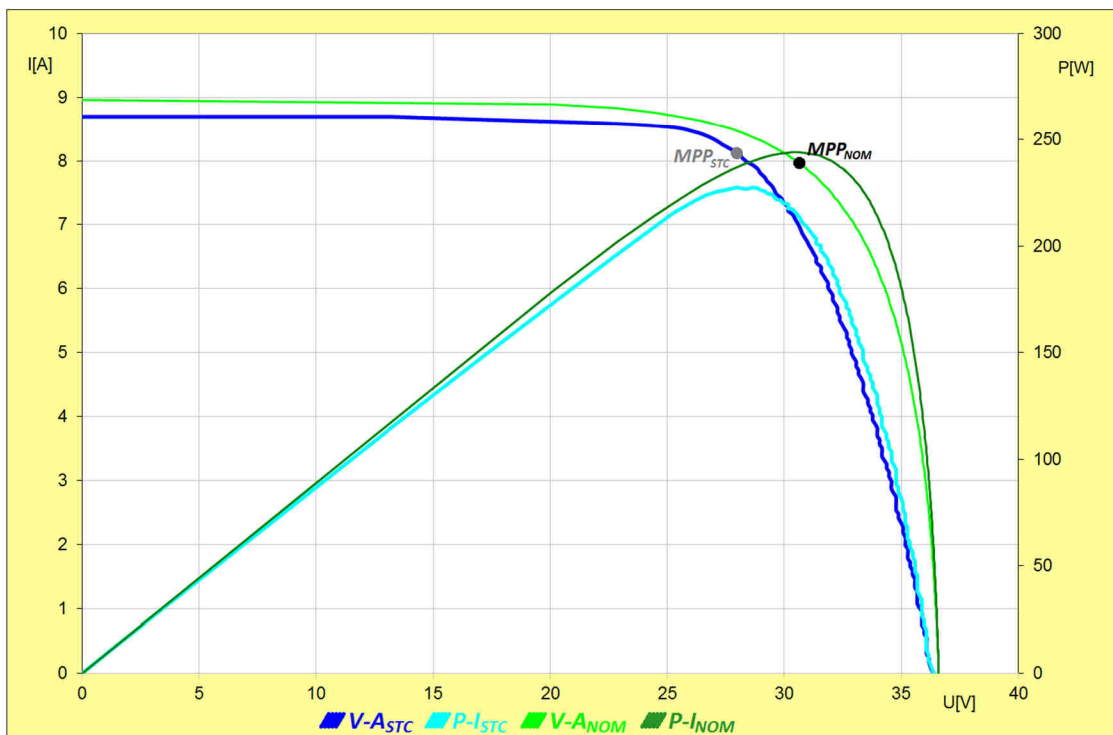
U sedmi modulů ve FV poli detekována LID a proto bylo nutné tyto moduly podrobit měření V-A charakteristik, pro ověření jejich správné funkce. V Tab. 5.2-4 jsou uvedeny elektrické parametry FV modulů s LID odečtené z měřených V-A charakteristik, jednotlivé moduly jsou označeny dvojčíslem, přičemž první značí číslo FV stringu a druhé pořadí modulu.

		U_{OC} [V]	I_{SC} [A]	U_{MPP} [V]	I_{MPP} [A]	P_{MPP} [W]
	Jmenovité hodnoty	36,60	8,96	30,50	8,00	240,00
Panel 3.11	STC	36,46	8,79	28,20	8,20	231,20
	Odchylka	-0,4%	-1,9%	-7,6%	+2,5%	-3,7%
Panel 2.3	STC	36,58	8,89	28,20	8,24	232,50
	Odchylka	±0,0%	-0,8%	-7,6%	+3,0%	-3,1%
Panel 2.5	STC	36,08	8,89	28,1	8,13	228,4
	Odchylka	-1,4%	-0,7%	-7,9%	+1,7%	-4,8%
Panel 2.6	STC	36,32	8,75	28,32	7,99	226,28
	Odchylka	-0,8%	-2,34%	-7,0%	-0,1%	-5,72%
Panel 2.8	STC	36,18	8,83	27,2	8,25	228,2
	Odchylka	-1,1%	-1,5%	-9,3%	+3,1%	-4,9%
Panel 2.10	STC	36,39	8,83	28,1	8,18	229,6
	Odchylka	-0,6%	-1,5%	-8,0%	+2,3%	-4,3%
Panel 2.11	STC	36,38	8,70	28,0	8,13	227,5
	Odchylka	-0,6%	-2,9%	-8,3%	+1,7%	-5,2%

Tab. 5.2-4 Elektrické parametry FV modulů s LID odečtené z měřených V-A charakteristik



Obr. 5.2-6 V-A charakteristika FV modulu 2.6



Obr. 5.2-7 V-A charakteristika FV modulu 2.11

Dle Tab. 5.2-4 došlo k nejvyššímu poklesu výkonu u modulů s označením 2.6 a 2.11, proto jsou jejich V-A charakteristiky uvedeny na Obr. 5.2-6 a 5.2-7. Jak již bylo uvedeno v kapitole 4.2.11 projevuje se LID snížením generovaného proudu a tím i výkonu FV modulu, stejně tak klesá i jeho zkratový proud. Z uvedených V-A charakteristik je pokles zkratového proudu u testovaných modulů patrný, ovšem nepřesahoval uváděnou maximální hranici 5%, resp. nepřesahoval u žádného ani 3%, a výsledný pokles výkonu těchto modulů je z větší míry způsoben již výše zmíněnou materiálovou degradací. Vzhledem k tomu lze LID v tomto stádiu považovat spíše za vizuální problém, který sice snižuje výkon FV modulů, ale tento pokles není natolik výrazný, aby ovlivňoval výkon celého systému, to se ovšem může postupem času změnit, protože LID je nezastavitelný proces a žloutnutí krycí folie se bude stupňovat a způsobovat stále výraznější zastínění FV článků, což ve výsledku způsobí výrazný pokles jejich výkonu, který ovlivní výkon celého FV stringu.

Kontrola termovizní kamerou

Pro ověření výsledků měření, které naznačují, že FV pole je v pořádku, tj. není zasaženo žádnými dalšími defekty, vyjma zjištěné LID, které by způsobovaly značný pokles výkonu a tím zhoršovaly výtěžnost systému. Pomocí termovizní kamery byly zkontrolovány z obou stran všechny moduly ve FV poli a také konektory propojující moduly, termovizní kontrole byl podroben také stringbox R-DC i hlavní rozváděč R-FV, pro ověření, zda jsou všechny šroubové spoje a konektory v pořádku a nezpůsobují zvýšení přechodového odporu.

Na Obr. 5.2-8 je zobrazen termovizní snímek propojovacího boxu FV modulu 2.8, u něhož byl při ověřování vlivu LID zjištěn výrazný pokles napětí v bodě MPP. Jak lze na snímku pozorovat, propojovací box ani konektory nevykazují žádné výrazné zvýšení teploty, což vylučuje zvýšení přechodového odporu, který by způsobil výkonové ztráty, stejně tak tomu bylo i u zbylých modulů FV pole.



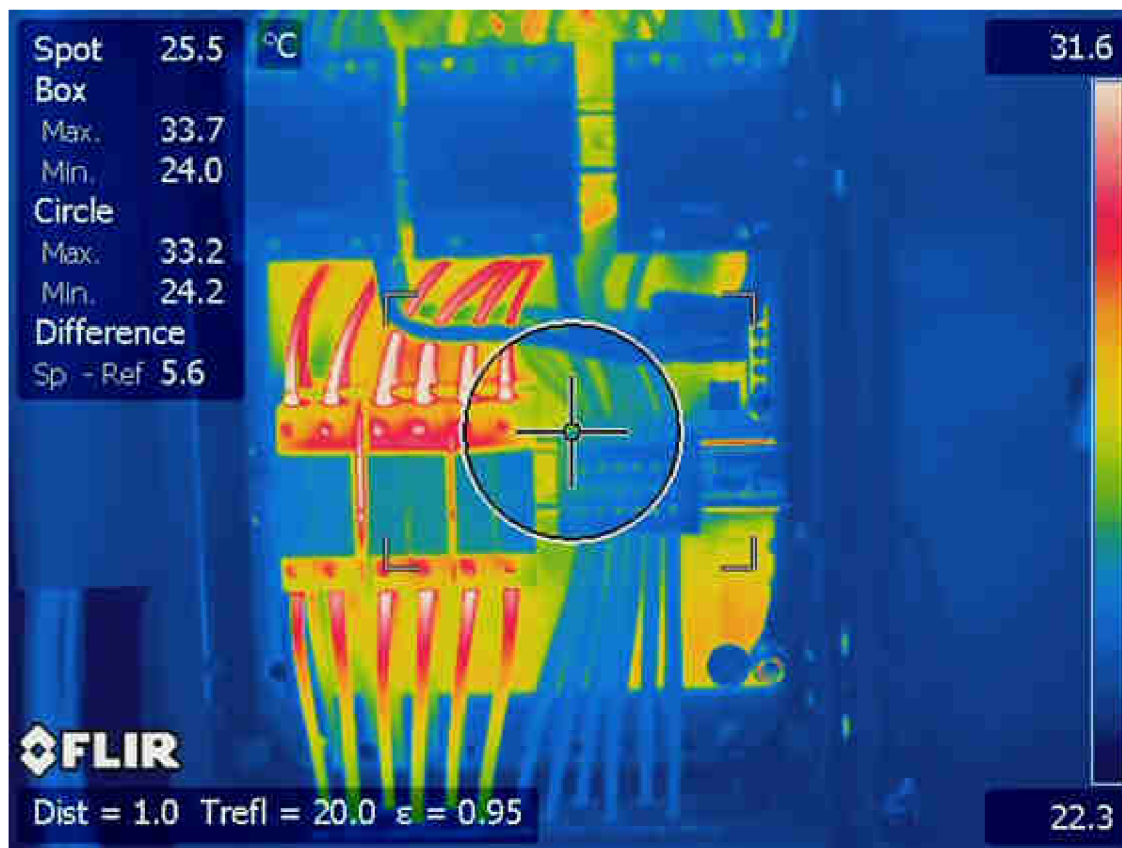
Obr. 5.2-8 Snímek připojovacího boxu a konektorů FV modulu 2.8



Obr. 5.2-9 Termovizní pohled na část FV pole

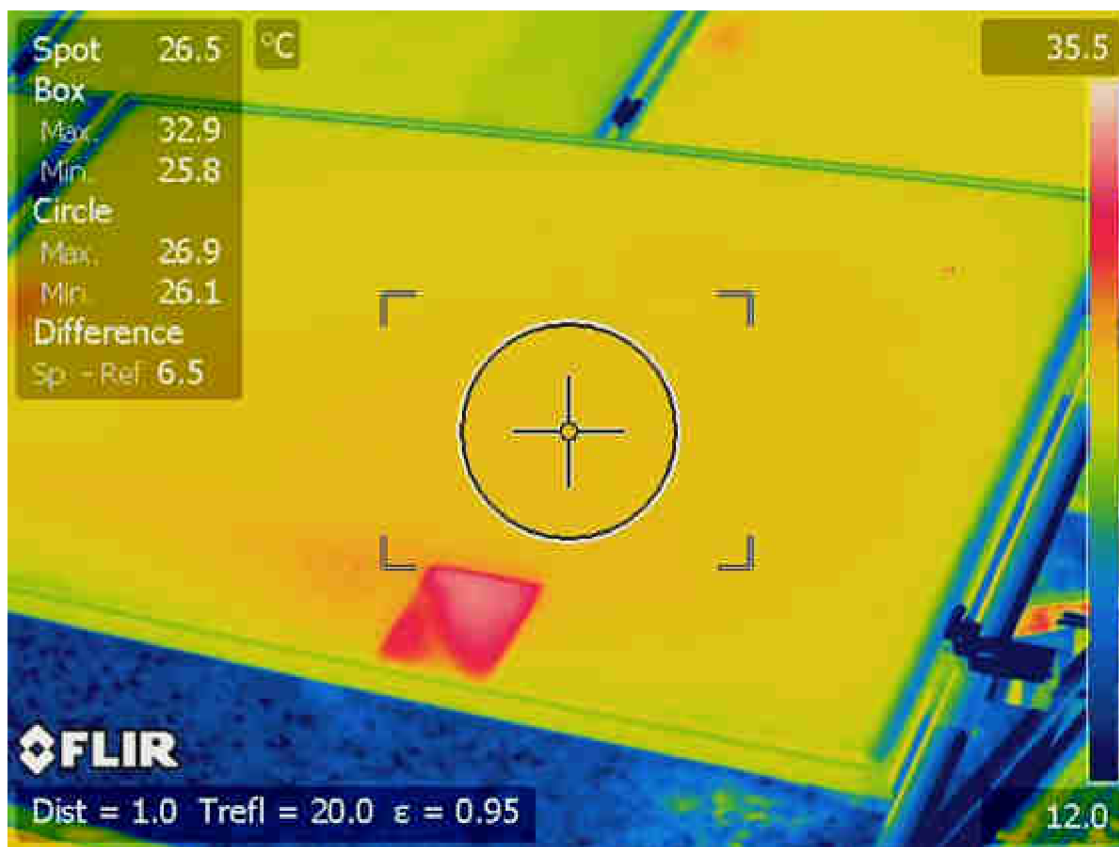
Na Obr. 5.2-9 je uveden jeden ze snímků FV pole, z něhož je patrné, že FV nejsou zatíženy žádnými defekty, typu „HOT-SPOT“ ani dalšími, které by se projevily zvýšením teploty FV modulu či jednotlivých FV článků. Místa se zvýšenou teplotou jsou způsobena umístěním propojovacích boxů, které zhoršují chlazení FV modulu v daném místě, ovšem zjištěný nárůst teploty nepřevyšoval 5°C oproti teplotě okolního povrchu.

Na následujícím Obr. 5.2-10 je termovizní snímek stringboxu R-DC, který potvrzuje, že všechny kontakty a šroubové spoje jsou vhodně dotaženy a nezpůsobují nežádoucí zvýšení teploty. Na obrázku je viditelné pouze běžné provozní oteplení pojistkových odpojovačů a k nim připojených vodičů, které však nepřesahuje 34°C.



Obr. 5.2-10 Termovizní snímek stringboxu R-DC

Při pokračující termovizní kontrole, která byla prováděna v brzkých dopoledních hodinách bylo odhaleno zastínění jednoho FV článku, způsobené jímací tyčí ochrany proti blesku, projevující se znatelným zvýšením teploty postiženého článku a mírným snížením výkonu celého FV modulu, jak je uvedeno na Obr. 5.2-11 a podobně tomu bylo i u několika dalších FV modulů. Vzhledem tomu, že měření bylo prováděno v dubnu, lze usuzovat, že během zimních měsíců, kdy je slunce níže nad obzorem, zastíní jímací tyče větší část FV modulů, jejich pokles výkonu by již mohl znatelně ovlivnit výkon celého stringu, i přes to, že k tomuto zastínění dochází pouze na krátkou dobu v dopoledních hodinách, z dlouhodobého hlediska by se toto pravidelné zastínění mohlo projevit nižšími energetickými zisky v zimních měsících. Podkladem pro toto tvrzení je fakt, že během ověřování vlivu nejčastějších defektů bylo zjištěno, že tento typ zastínění, které zasahuje do všech tří by-pass sektorů FV modulu způsobuje pokles jeho výkonu až o 10%.



Obr. 5.2-11 Oteplení zastíněného článku

Ověřovací měření

Vzhledem k tomu, že měření probíhalo během několika dnů, bylo možné ověřit, zda se V-A křivky a elektrické parametry stejného FV modulu změřené v rozdílné dny shodují či v jaké míře se liší. Naměřené hodnoty byly pro porovnání přepočteny na STC a jsou uvedeny v Tab. 5.2-5.

	Měření č.1		Měření č.2		Jmenovité hodnoty
	STC	odchylka	STC	Odchylka	
U_{OC} [V]	36,53	-0,2%	36,43	-0,5%	36,60
I_{SC} [A]	8,83	-1,5%	8,92	-0,5%	8,96
U_{MPP} [V]	28,30	-7,1%	28,20	-7,6%	30,50
I_{MPP} [A]	8,15	+1,9%	8,22	+2,7%	8,00
P_{MPP} [W]	230,9	-3,8%	231,7	-3,5%	240,00

Tab. 5.2-5 Naměřené hodnoty FV modulu 2.4 přepočtené na STC

Naměřené hodnoty se shodují v rozmezí $\pm 1\%$, což souvisí zejména s přesností měření intenzity záření a teploty modulů, které se věnovala kapitola 4.3.3. Při obou měřeních byly oba snímače instalovány na jiné místo FV modulu a odchylka v úhlu snímače ozáření a odlišný teplotní kontakt snímače teploty způsobili zmíněné odchylky naměřených hodnot, ovšem nelze opomenout ani přesnost měření elektrických parametrů. Průběhy V-A charakteristik z obou měření jsou uvedeny v příloze a z jejich tvaru je patrné, že se shodují.

Účinnost MPP trackeru

Pro ověření, zda MPP tracker měniče nastavuje optimální pracovní bod na základě aktuálních podmínek, byla zvolena metoda, která je uvedena v kapitole 4.2.8. Naměřené a vypočtené hodnoty jsou uvedeny níže. Grafické zpracování jednotlivých křivek je v příloze.

String 1

Měření V-A charakteristiky:

Maximální výkon $MPP_{modif} = 3228,6 \text{ W}$ při ozáření $I_{rr} = 1012 \text{ W/m}^2$ a teplotě $T = 35,4 \text{ }^\circ\text{C}$

Měření aktuální hodnoty napětí:

Měřené napětí $U_{měř} = 402 \text{ V}$ při ozáření $I_{rr} = 972 \text{ W/m}^2$ a teplotě $T = 35,1 \text{ }^\circ\text{C}$

Proud odpovídající měřenému napětí odečtený z V-A charakteristiky $I_{odp} = 7,99 \text{ A}$

$$Diff_{MPP} = \left(1 - \frac{U_{měř} \cdot I_{odp}}{MPP_{měř}}\right) * 100 = \left(1 - \frac{402V \cdot 7,99A}{3228,6 \text{ W}}\right) * 100 = \mathbf{0,51\%} \quad (18)$$

String 2

Měření V-A charakteristiky:

Maximální výkon $MPP_{modif} = 3202,8 \text{ W}$ při ozáření $I_{rr} = 1008 \text{ W/m}^2$ a teplotě $T = 35,0 \text{ }^\circ\text{C}$

Měření aktuální hodnoty napětí:

Měřené napětí $U_{měř} = 407 \text{ V}$ při ozáření $I_{rr} = 961 \text{ W/m}^2$ a teplotě $T = 34,6 \text{ }^\circ\text{C}$

Proud odpovídající měřenému napětí odečtený z V-A charakteristiky $I_{odp} = 7,83 \text{ A}$

$$Diff_{MPP} = \left(1 - \frac{U_{měř} \cdot I_{odp}}{MPP_{měř}}\right) * 100 = \left(1 - \frac{407V \cdot 7,83A}{3202,8 \text{ W}}\right) * 100 = \mathbf{0,50\%} \quad (19)$$

String 3

Měření V-A charakteristiky:

Maximální výkon $MPP_{modif} = 3226,4 \text{ W}$ při ozáření $I_{rr} = 1000 \text{ W/m}^2$ a teplotě $T = 35,3 \text{ }^\circ\text{C}$

Měření aktuální hodnoty napětí:

Měřené napětí $U_{měř} = 408 \text{ V}$ při ozáření $I_{rr} = 968 \text{ W/m}^2$ a teplotě $T = 34,9 \text{ }^\circ\text{C}$

Proud odpovídající měřenému napětí odečtený z V-A charakteristiky $I_{odp} = 7,87 \text{ A}$

$$Diff_{MPP} = \left(1 - \frac{U_{měř} \cdot I_{odp}}{MPP_{měř}}\right) * 100 = \left(1 - \frac{408V \cdot 7,87A}{3226,4 \text{ W}}\right) * 100 = \mathbf{0,48\%} \quad (20)$$

Dle zjištěných výsledků, lze potvrdit že, střídač Sunways 10000, který je vybaven třemi odděleně pracujícími MPP trackery s udávanou účinností >99%, opravdu nastavuje optimální pracovní bod každého stringu s vysokou přesností. Také rozsah napětí 350V až 750V pro MPP tracking je vyhovující, protože jmenovité napětí každého stringu v bodě MPP je 457,5V.

Ověření účinnosti měniče

Pro ověření účinnosti měniče byl vstupní a výstupní výkon měniče odečten z webového serveru Sunways Browser, který umožňuje vzdálený přístup k měniči a poskytuje informace o aktuálním stavu, množství vyrobené elektrické energie a dalších parametrech (viz příloha).

$$\eta_{inv} = \frac{P_{výst}}{P_{vst}} * 100 = \frac{3,081 \text{ kW}}{3,154 \text{ kW}} = \mathbf{97,69\%} \quad (21)$$

Na základě zjištěné hodnoty bylo ověřeno, že střídač pracuje s vysokou účinností, která dokonce převyšuje výrobcem definovanou účinnost 96,3%.

Provozní výkonnost FVE

Pro ověření kvality systému slouží ukazatel nazývaný PROVOZNÍ VÝKONOST, definovaný v kapitole 1.5.11, kterým lze vypočítat výtěžnost FV systému, tj. s jakou účinností systém přeměňuje dopadající sluneční energii na energii elektrickou nebo k jakým energetickým ztrátám v systému dochází.

Dlouhodobá provozní výkonnost

K výpočtu byly použity data o množství elektrické energie vyrobené FVE v každém měsíci roku 2015, které byly získány z webového serveru Sunways Browser, určeném pro vzdálený přístup ke střídači. Zjištěná data jsou uvedeny v tabulce v příloze. Bohužel nebyl k dispozici záznam o celkové agregované energii slunečního záření dopadající na plochu FV panelů za rok 2015, proto byl pro výpočet použit údaj z internetového portálu PV-GIS, který však udává pouze vypočtenou hodnotu, která přesně neodpovídá celkové agregované sluneční energii, ale pro výpočet je tento údaj dostačující.

$$PR = \frac{E_{celk}}{G_E * A_{celk} * \eta_{FV}} * 100 = \frac{12736,27 \text{ kWh}}{1310 \text{ kWh/m}^2 * 73,66 \text{ m}^2 * 0,1466 \%} * 100 = \mathbf{90,03\%} \quad (22)$$

, kde G_E je celková agregovaná sluneční energie, E_{celk} je celková vyrobená elektrická energie, A_{celk} je celková plocha FV modulů a η_{FV} je jmenovitá účinnost FV modulu.

Vzhledem k tomu, že elektrárna byla v roce 2015 v nepřetržitém provozu, lze ve výpočtu zanedbat U_o neboli celkovou agregovanou energii slunečního záření, kterou nebylo možno konvertovat z důvodů výpadku FV systému a jiných.

Vypočtená hodnota provozní výkonnosti naznačuje, že se jedná o kvalitně navrhnutý a provozovaný FV systém, protože průměrná hodnota provozní výkonnosti FVE v ČR se pohybuje mezi 80 a 90 %, u vysoce kvalitních 95 %. Toto zjištění jenom potvrzuje výsledky měření, ovšem při výpočtu nebyla použita přesná hodnota celkové agregované energie slunečního záření, proto bylo zapotřebí provést měření přímo na FVE, jejíž výpočet je uveden níže.

Aktuální provozní výkonnost

Pro ověření aktuální provozní výkonnosti byla během několika hodin měřena celková agregovaná energie slunečního záření v rovině FV modulů pyranometrem SG02 a celková elektrická energie byla odečtena z elektroměru v hlavním rozváděči R-FV.

Naměřená data:

Celková agregovaná sluneční energie $G_E = 1,85 \text{ kWh/m}^2$

Celková vyrobená elektrická energie $E_{celk} = 18,90 \text{ kWh}$

$$PR = \frac{E_{celk}}{G_E * A_{celk} * \eta_{FV}} * 100 = \frac{18,90 \text{ kWh}}{1,85 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2} * 73,66 \text{ m}^2 * 0,1466 \%} * 100 = \mathbf{94,61\%} \quad (23)$$

, kde A_{celk} je celková plocha FV modulů a η_{FV} je jmenovitá účinnost FV modulu

Zjištěná hodnota jenom podporuje tvrzení uvedené výše a FV systém lze považovat za velice kvalitní a plně funkční, i přes zjištěnou LID, plošnou materiálovou degradaci způsobující pokles výkonu o cca 4% a vyskytující se zastínění FV modulů jímacími tyčemi.

5.2.7 Zhodnocení výsledků a návrh řešení

Nejdříve byla provedena kontrola skutečného provedení FVE, které zcela odpovídá požadavkům ČSN 332000-7-712. Při kontrole však byla odhalena degradace izolace použitých vodičů, ovšem provedené měření izolačního odporu neodhalilo žádnou funkční vadu, ale vzhledem k tomu, že FVE je v provozu teprve čtvrtým rokem a degradace izolace se bude stupňovat, doporučuji pravidelné měření izolačního odporu, pro včasné odhalení případných izolačních poruch. Při kontrole bylo také odhaleno značné množství volně visících konektorů, které by bylo vhodné upevnit, aby nedošlo k jejich rozpojení, přičemž některé z nich nebyly dostatečně dotažené. Závažným problémem je nevhodné umístění čidla klimatizace v těsné blízkosti FV modulu, které v odpoledních hodinách tento modul zastiňuje, čímž způsobuje pokles výkonu celého stringu, proto je zapotřebí jeho včasné odstranění. Dále také doporučuji pravidelné čištění povrchu FV modulů, protože jak již bylo uvedeno výše, znečištění povrchu modulu způsobuje pokles jeho výkonu a ptačí trus způsobuje lokální nadměrné zahřívání FV článků. Kromě výše uvedených, nebyly během kontroly FV systému zaznamenány žádné další nedostatky nebo viditelná poškození FV modulů, nosných konstrukcí či kabeláže.

Při měření a diagnostice FV pole nebyly odhaleny žádné vážné poruchy či defekty, způsobující výrazný pokles výkonu systému, pouze u sedmi panelů byla odhalena LID, která však v tomto stádiu nezpůsobuje znatelný pokles výkonu postižených modulů. Postupem času se však pokles výkonu může projevit a proto doporučuji u těchto modulů, při pravidelných kontrolách systému, kontrolovat míru zažloutnutí a případně měřením ověřovat jejich elektrické parametry. Testováním byla také odhalena plošná materiálová degradace FV modulů, způsobující pokles jejich výkonu, který se pohyboval kolem 4%, což je ovšem po čtyřletém provozu hodnota garantovaná výrobcem. Ani termovizní kontrola FV pole a rozváděčů neodhalila žádné defekty či nedotažené spoje, které by negativně ovlivňovaly provoz systému, jediným zjištěním bylo pravidelně se opakující zastínění částí FV modulů jímacími tyčemi ochrany proti blesku, které sice trvá poměrně krátkou dobu, ale během zimních měsíců může způsobovat snížení energetických zisků. Bylo také ověřeno, že MPP tracker střídače nastavuje optimální pracovní bod FV stringu a samotný střídač pracuje s vysokou účinností konverze. Ověření provozní výkonnosti, která dosahuje vynikajících 94,6%, jenom potvrzuje s přihlédnutím ke zjištěným nedostatkům, že se jedná o kvalitní FV systém.

Vzhledem k výše uvedeným zjištěním je pro zajištění stabilního a optimálního provozu v následujících letech, zapotřebí provádět pravidelné kontroly FVE, které zahrnují nejenom vizuální kontrolu, ale i případné měření elektrických parametrů. Vhodným řešením je také pravidelná kontrola provozu střídače pomocí webového serveru Sunways Browser, který poskytuje informace o aktuálním stavu střídače, množství vyrobené elektrické elektřiny a další parametry. Protože je střídač Sunways připojen k internetu umožňuje také zasílání případných chybových hlášení na zvolený e-mail, čehož je vhodné využít.

V současné době je však pro zajištění trvalého dohledu nad FV systémem, pro optimalizaci jeho výkonu a zvýšení bezpečnosti nejvhodnější řešení od společnosti Tigo Energy. Jednotky Maximizer patří mezi velice efektivní a flexibilní komponenty pro minimalizaci ztrát při provozu FVE. Řešení optimalizace spočívá v instalaci prvků Maximizer (MM-2ES) na každý druhý FV modul, do nichž se fyzicky připojí vývody dvou modulů a vodiče propojující moduly ve stringu, každý z modulů je následně monitorován a zpravován samostatně, případně je možná instalace jednotek MM-ES na každý modul samostatně. Jednotky Maximizer, později pouze MM, komunikují přes bezdrátovou komunikační bránu Tigo Energy Gateway (GTWY) a dodávají data do řídicí jednotky Tigo Cloud Connect (TIGO-16001), která je v reálném čase zpracovává, vysílá

zpětné řídicí signály, zjištěné údaje zasílá na vzdálený server softwaru Maxi Manager, který umožňuje vzdálený monitoring a kontrolu systému a to i přes mobilní telefon, dále také upozorňuje na přednastavené události a díky analytickým nástrojům porovnává skutečnou a očekávanou produkci a navrhuje případná opatření pro maximálně efektivní provoz systému. Ukázka zapojení jednotek MM-ES50 na FV moduly a pracovního prostředí Maxi Manageru je uvedena v příloze.

Jednotky MM monitorují výstup FV modulu, předávají data do řídicí jednotky a na základě příchozích signálů přizpůsobují výkon, resp. nastavují optimální pracovní bod jednotlivých modulů, tak aby výkonově vyhověly celému FV stringu, protože MPP tracker střídače nastavuje optimální pracovní bod na výsledné V-A křivky celého stringu a nedokáže regulovat výkon každého modulu. Přičemž FV modul je prvek s jedinečnými elektrickými vlastnostmi, jež jsou i při pečlivém výběru, vlivem nedokonalosti výroby, vždy u jednotlivých modulů rozdílné. Výkon FV modulu se mění v průběhu stárnutí panelu a je ovlivňován externími vlivy při provozu, mezi které patří nečistoty, napádané listí, stíny okolních předmětů, mraky a další.

Tomuto optimalizačnímu řešení se dostává největšího úspěchu u systémů, které jsou pravidelně a nerovnoměrně zastiňovány stožáry, stromy, vikýři či okolními budovami. U těchto systémů nezávislé testy laboratoře PHOTON prokázaly zvýšení výkonnosti o průměrně 20%, čehož je dosaženo díky iterativnímu „samoučícímu“ algoritmu, který na základě již uplynulých událostí aktualizuje analytické výpočty, čímž se zefektivňuje výkonová optimalizace. Výborných optimalizačních výsledků dosahuje systém Maximizer i u ideálně navržených nezastíněných systémů, u kterých nezávislé testy prokázaly minimálně 3% zvýšení výkonnosti, protože i tyto solární instalace jsou v reálných podmínkách vystaveny prachu, rozdílným teplot, mrakům a materiálové degradaci. Což je případ i FVE T14, přičemž použití jednotek MM je v tomto případě vhodné také z hlediska objevujícího se částečného zastínění modulů jímacími tyčemi a detekované LID, protože jak již bylo řečeno, u modulů s LID se bude výkon nadále snižovat a tím výkonově ovlivňovat celý string. Jednotky MM nejenom výkonově přizpůsobují jednotlivé moduly, ale také fungují podobně jako by-pass diody, přičemž částečně či zcela přemostí FV modul s výrazně nižším výkonem, tak aby v něm nedocházelo k výkonovým ztrátám způsobeným vyšším generovaným proudem ostatních modulů, který by přes tento modul protékal.

Ekonomické zhodnocení

Pro tento FV systém je zapotřebí 24 kusů jednotek MM-ES50, jejichž průměrná cena se pohybuje okolo 2000 Kč, a jedné řídicí jednotky TIGO-16001 dodávané v kompletu s komunikační bránou, venkovním měřicím čidlem a se softwarem Maxi Manager za průměrnou cenu 7400 Kč. Celková cena optimalizačního řešení tedy dosahuje 55400 Kč, bez nákladů na montáž. Tato částka vzhledem k celkovému hrubému zisku za rok 2015, dle rovnice (24), se může jevit dosti vysoká.

$$HZ_{2015} = E_{celk} * VC_{2012} = 12736,27 \text{ kWh} * 6,538 \text{ Kč/kWh} = 83269,73 \text{ Kč} \quad (24)$$

, kde HZ_{2015} je hrubý zisk z výroby elektrické energie v roce 2015, E_{celk} je celková vyrobená elektrická energie v roce 2015 a VC_{2012} výkupní cena elektrické energie (viz příloha).

Ovšem při uvažování konstantní výroby z roku 2015 v následujících letech by se zvýšením výkonnosti o 3% každoročně došlo ke zvýšení hrubého zisku o 2498 Kč, přičemž by se doba návratnosti pohybovala kolem 22 let a většina výrobců udává životnost FV modulů kolem 25 let.

$$HZ_{+} = 0,03 * E_{celk} * VC_{2012} = 0,03 * 12736,27 \text{ kWh} * 6,538 \text{ Kč/kWh} = 2498,09 \text{ Kč} \quad (25)$$

, kde HZ_{+} je zvýšení hrubého zisku.

Vypočtené hodnoty uvedené na předchozí straně jsou pouze orientační, protože nelze uvažovat konstantní výrobu v následujících letech, neboť množství vyrobené elektrické energie se postupem času snižuje, vlivem snižování výkonu FV modulů. Je však zapotřebí si uvědomit, že toto snižování výkonu způsobené stárnutím, LID a dalšími výše zmíněnými vlivy nebude u všech modulů rovnoměrné. A proto se bude optimalizační systém stále více uplatňovat v maximalizaci výkonu celého FV systému a tím bude mezitím narůstat i jeho podíl na hrubém zisku.

Zejména přínosný bude optimalizační systém v případě poruchy ve FV poli, například při zkratu FV modulu či jiném jeho poškození, které by vedlo k výpadku celého systému, v tomto případě dojde pouze k odpojení postiženého FV modulu a systém bude nadále funkční, uživatel bude následně o této situaci informován a může zprostředkovat okamžitou výměnu poškozeného modulu, v opačném případě by výpadek systému způsoboval každým dnem značnou ekonomickou ztrátu. Při uvažování výpadku během letních měsíců, kdy je výroba elektrické energie nejvyšší, by například výpadek během července 2015 způsoboval ušlý zisk 389 Kč každým dnem.

$$UZ_{den} = \frac{E_{7,2015}}{31} * VC_{2012} = \frac{1844,38 \text{ kWh}}{31} * 6,538 \text{ Kč/kWh} = 388,99 \text{ Kč} \quad (26)$$

, kde UZ_{den} je ušlý zisk za jeden den výpadku FVE a $E_{7,2015}$ je celková vyrobená elektrická energie v červenci roku 2015.

Vzhledem k výše uvedenému je optimalizační systém Maximizer od společnosti Tigo Energy nejlepším řešením nejenom pro tento FV systém, ale i pro všechny ostatní, a to i přes poměrně vysoké pořizovací náklady, protože zajistí spolehlivý, efektivní a bezstarostný provoz FVE.

Princip funkce optimalizačního systému je dostatečně vysvětlen na videoukázce, prezentované přímo společností Tigo, dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=yJ1luch9Yjo>.

Obdobné optimalizační řešení nabízí například i společnost SolarEdge, ovšem z hlediska nabízených funkcí, dostupnosti komponent a míře zvýšení výkonnosti nezastíněného systému (průměrně 1,6%) je řešení Tigo Energy jednoznačně výhodnější.

ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo teoretické objasnění problematiky fotovoltaických elektráren, jejich diagnostiky, kontroly a měření výkonnosti, vč. možných negativních vlivů na jejich provoz a následná aplikace teoretických znalostí při praktické kontrole a diagnostice FVE, dle mého názoru bylo vytyčených cílů dosaženo.

Práce se skládá z více částí, na úvod práce popisuje princip funkce FV článku a věnuje se konstrukci, výrobě a vývoji FV článků a panelů, a také popisuje ostatní nezbytné prvky a komponenty, vč. jejich použití v jednotlivých typech fotovoltaických systémů.

V další části jsou popsány elektrické parametry FV článků a panelů, zejména parametry, které lze zjistit měřením V-A charakteristik a také parametry, které ovlivňují tvar V-A charakteristik, nechybí zde ani neelektrické parametry, které výrazně ovlivňují výkon FV článků.

Ve třetí části jsou uvedeny poruchy fotovoltaických systémů, mezi které patří materiálové a procesní defekty fotovoltaických článků, ale také typické defekty FV panelů a jejich projevy. Dále jsou zde uvedeny negativní faktory ovlivňující chod celého systému, jež souvisí nejen s klimatickými vlivy, ale také se samotným návrhem fotovoltaického systému.

Čtvrtá část se zabývá možnostmi zvýšení efektivity výroby elektrické energie z FVE na základě praktických zkušeností jejich provozovatelů, zejména se zabývá kvalitou návrhu a provozu FV systémů, popisuje také nejčastější chyby a omyly, které negativně ovlivňují celý FV systém.

V následující části jsou na základě technických norem stanoveny postupy pro kontrolu provedení FVE, postupy pro měření a diagnostiku jednotlivých částí systému a také další náležitosti, které s kontrolou a měřením souvisí. Nechybí zde ani faktory ovlivňující průběh měření a popis typických problémů a defektů FV generátorů a jejich vliv na tvar V-A charakteristik. Jsou zde také popsány požadavky na měřicí přístroje, nejčastější chyby měření a způsoby vyhodnocení naměřených dat.

Poslední část práce je praktická. Nejprve se zabývá ověřením a popisem vlivu nejčastějších defektů FV generátorů na tvar jejich V-A charakteristik, následně provedením jednotlivých kroků kontroly a diagnostiky konkrétní FVE elektrárny, vyhodnocením zjištěných údajů a naměřených dat a návrhem optimalizačních opatření pro zvýšení efektivity provozu dané FVE.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] POULEK, Vladislav a Martin LIBRA. Konstrukce a výroba fotovoltaických článků a panelů. ELEKTRO [online]. 3/2010, s. 9. [cit. 2015-04-10]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/40646.pdf>
- [2] NOVOTNÝ, T. *Využití obnovitelných zdrojů realizací fotovoltaické elektrárny Drásov*. Brno: VUT v Brně, Fakulta podnikatelská, 2009. 118 s. [cit. 2015-04-10]. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Kříž, Ph.D.
- [3] MASTNÝ, Petr, Jan MORÁVEK a Pitron JIŘÍ. *Skriptum: Malé zdroje elektrické energie*. Brno, 2015. [cit. 2015-04-10]. Dostupné z: <https://moodle.vutbr.cz/mod/resource/view.php?id=58419>
- [4] Fotovoltaika. *Energie živlů*. W.E.B Větrná Energie 2010 [cit.2015-11-07]. Dostupné z: http://www.vetrna-energie.cz/energie-zivlu/slunce_11.
- [5] KOLEKTIV AUTORŮ. *Obnovitelné zdroje energie a možnosti jejich uplatnění v ČR*. ČEZ, a.s. 2007. 183 s. [cit.2015-11-07]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/file/energie-a-zivotni-prostredi/oze-cr-all-17-01-obalka-in.pdf>
- [6] MURTINGER, Karel; BERANOVSKY, Jiří; TOMEŠ, Milan. *Fotovoltaika :Energie ze slunce*. Vyd. 1. Praha : EkoWATT, 2007. 81 s. ISBN 978-80-7366-1007. [cit.2015-11-07].
- [7] KIMERLING, L. C., BENTON, J. L. *Physica B*. Vol.116, 297 s. 1983. [cit.2015-11-07].
- [8] *Potential Induced Degradation (PID)*. SMA Solar Technology AG. [online] 2010 [cit.2015-11-07]. Dostupné z: <http://files.sma.de/dl/7418/PID-TIUEN113410.pdf>
- [9] KAPLANI E.; KAPLANIS S. *Energy performance and degradation over 20 years performance of BP c-Si PV modules. Simulation Modelling Practice and Theory*, Volume 19, Issue 4, April 2011, str. 1201-1211, ISSN 1569-190X. [cit.2015-11-07].
- [10] EUROPE SOLAR, *Schaden an pv modulen*, [online]. [cit.2015-11-07]. Dostupné z: http://www.europesolar.de/catalog/index.php?main_page=page&id=44&language=de&zenid=229e0141cebbaab818b1d36794b8d585
- [11] TOMEŠ, Milan. *Zkušenost soudního znalce z posuzování FVE v roce 2011*. Ostrava, 2012. [cit.2015-11-07]. Dostupné z: <http://uniesoudnichznalcu.cz/public/media/files/e04-2012.pdf>
- [12] JAKUBES, Jaroslav. *Fenomén „Snail Trails“ / „šnečí cestičky“: — je ohrožen výkon FVE? TZB-info* [online]. 2012 [cit. 2015-11-10]. Dostupné z: <http://oze.tzbinfo.cz/fotovoltaika/9020-fenomen-snail-trails-snecicesticky>
- [13] VALA, Zbyněk. *Fotoluminiscenční metody detekce defektů solárních článků*. Brno, 2009. 65 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Vaněk, Ph.D. [cit. 2015-11-10]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=14213
- [14] JANDOVÁ, Kristýna. *Diagnosticke metody plošného rozložení defektů solárních článků*. Brno, 2008. 92 s. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie. Vedoucí doktorské práce doc. Ing. Jiří Vaněk, Ph.D. [cit. 2015-11-10].
- [15] INDRA, Jiří. *Degradace solárních článků světlem*. Brno, 2010. 73 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Vaněk, Ph.D. [cit. 2015-11-10].

- [16] GHOSH, M. et. al. *Light-induced degradation of multicrystalline silicon solar cells*. In 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference. Dresden, Germany 2006. [cit. 2015-11-10].
- [17] DAMIANI, Ben, HILALI, Mohamed, ROHATGI, Ajeet. *Light induced degradation in manufacturable multi-crystalline silicon solar cells*. Georgia Institute of Technology. [cit. 2015-11-10].
- [18] STANĚK, Kamil. *Fotovoltaika pro budovy*. FST ČVUT [online]. [cit. 2015-11-11]. Dostupné z: http://fotovoltaika.fsv.cvut.cz/download/Prezentace/FV_prez_BaP.pdf
- [19] ZIMMERMANN, Martin. *Komplexní diagnostika fotovoltaických systémů*. Praha, 2015. 41 s. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektrotechnologie. Vedoucí diplomové práce Ing. Tomáš Finsterle [cit. 2015-11-12].
- [20] LAHKÝ, Martin. *Pokles výkonu fotovoltaických elektráren v důsledku vysokonapětového stresu*. TZB-info [online]. 2015 [cit. 2015-11-12]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/12260-pokles-vykonu-fotovoltaickych-elektren-v-dusledku-vysokonapetoveho-stresu>
- [21] ŠTALMACH, Jakub. *Analýza V-A charakteristik jako metoda ověření parametrů FVE*. Plzeň, 2013. 86 s. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektroenergetiky a ekologie. Vedoucí diplomové práce Ing. Milan Bělík, Ph.D. [cit. 2015-11-12]. Dostupné z: <https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/10052/Stalmach%20Jakub%20-%20Diplomova%20prace%202013.pdf?sequence=1>
- [22] KLADIVA, Roman. *DLOUHODOBÉ SLEDOVÁNÍ PARAMETRŮ FOTOVOLTAICKÝCH PANELŮ*. Brno, 2013.[online]. Diplomová práce. VUT Brno. Vedoucí práce Ing. Roman Gvritishili. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=68659.
- [23] *Качество солнечных модулей, S-WAYS*, [Online]. Dostupné z: http://www.solarintech.ru/informations/quality_of_solar_modules/
- [24] MAČÁT, Jakub *Vlivy ovlivňující degradaci instalovaného výkonu fotovoltaické elektrárny*: diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2015. 94 s. Vedoucí práce byl doc. Ing. Jiří Vaněk, Ph.d.
- [25] *PID-Pokles výkonu FVE*. MyPower- Obnovitelné zdroje energie. 2015. [Online]. Dostupné z: <http://forum.mypower.cz/viewtopic.php?f=21&t=2304&start=0>
- [26] BENDA, Vítězslav. *Solární články z krystalického křemíku - základní technologie současné fotovoltaiky*. TZB-info [online]. 2006 [cit. 2015-11-12]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/3553-solarni-clanky-z-krystalickeho-kremiku-zakladni-technologie-soucasne-fotovoltaiky>
- [27] *Fotovoltaické systémy pro výrobu elektřiny*. CNE, a.s. [online]. 2015 [cit. 2015-11-12]. Dostupné z: <http://www.cne.cz/fotovoltaicke-systemy/uvod-do-fv-systemu/>
- [28] HASELHUHN, Ralf. *Fotovoltaika–Budovy jako zdroj proudu*, 1. vyd. Ostrava:HEL, 2010. 176 s. ISBN978-80-86167-33-6
- [29] HRŇA, L. *Fotovoltaický systém pro ostrovní provoz*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 36 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Hejčík. [cit. 2015-11-12]. Dostupné z: https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/3340/fotovoltaicky_system_pro_ostrovní_provoz_Lukas_Hrna.pdf?sequence=1
- [30] HNILICA, Pavel. *Jaké akumulátory (trakční baterie) budu potřebovat pro solární ostrovní systém* [online]. [cit. 2015-11-12]. Dostupné z: <http://www.solarnimoduly.cz/jaky-akumulator.html>

- [31] BAŘINKA, Radim. *Fotovoltaika a fotovoltaické systémy v podmínkách ČR a jejich navrhování- Solární články, panely a fotovoltaické systémy*. SOLARTEC s.r.o. [online]. [cit. 2015-11-12]. Dostupné z: http://www.mpo-efekt.cz/dokument/98_8050.pdf
- [32] BENDA, Vítězslav, Kamil STAŇEK a Petr WOLF. Učební texty k semináři: Fotovoltaické systémy [online]. 2011 [cit. 2015-11-12]. Dostupné z: http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura_04_1104.pdf
- [33] KLEČKA, Michal. *Měřicí pracoviště pro testování FV článků metodou LBIC*. Plzeň, 2012. 57 s. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací. Vedoucí diplomové práce Ing. Milan Bělík, Ph.D. [cit. 2015-11-12]. Dostupné z: <https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/2366/diplomova%20prace%20final.pdf?sequence=1>
- [34] HOFMAN, J. *Měřicí systém pro sledování efektivity fotovoltaického panelu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.
- [35] *Handbook: Measurements on PV systems*. METREL. Horluj, Slovenia 2012. 56s. [cit. 2016-01-19].
- [36] DOLENSKÝ, Jan. *Zvyšování efektivity provozu fotovoltaických elektráren - teorie vs. praxe*. TZB-info [online]. 2012 [cit. 2015-27-12]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/8344-zvysovani-efektivnosti-provozu-fotovoltaickych-elektren-teorie-vs-praxe>
- [37] CHOCHOLÁČ, J. *Využití bypassových diod ve fotovoltaických panelech*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 68s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Křivík, Ph.D. [cit. 2015-12-30]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=39536
- [38] *Kontrola solárních panelů: Využití termokamer při kontrole solárních panelů*. GEOTRONICS Praha, s.r.o. [online]. 2008 [cit. 2015-12-30]. Dostupné z: <http://www.geotronics.cz/termokamery/kontrola-solarnich-panelu>
- [39] *ČSN online pro jednotlivě registrované uživatele*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví [online]. [cit. 2013-12-10]. Dostupné z: <https://csnonline.unmz.cz/vyhledavani.aspx>

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha - Podpora výsledků