

Západočeská univerzita v Plzni
Fakulta elektrotechnická
Katedra materiálů a technologií

Diplomová práce

Příčiny požárů zaviněných závadami při provozu FVE

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

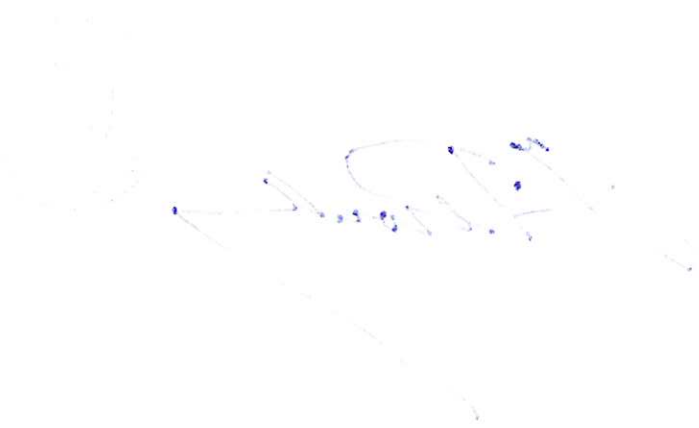
Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Šárka MORÁVKOVÁ**
Osobní číslo: **E19N0009P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Téma práce: **Příčiny požárů zaviněných závadami při provozu FVE**
Zadávací katedra: **Katedra materiálů a technologií**

Zásady pro vypracování

1. Vypracujte přehled možných příčin požárů zaviněných závadami při provozu FVE.
2. Sestavte souhrn legislativních a normativních požadavků souvisejících s požární bezpečností.
3. Odvodte praktické pokyny pro projektování, pravidelné revize, diagnostiku a údržbu FVE.
4. Proveďte kontrolu modelové fotovoltaické elektrárny.



Rozsah diplomové práce: **40 – 60 stran**
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. Podle domluvy s vedoucím

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Milan Bělík, Ph.D.**
Katedra elektroenergetiky


Konzultant diplomové práce: **Ing. Ondřej Král**
Katedra elektroenergetiky

Datum zadání diplomové práce: **9. října 2020**
Termín odevzdání diplomové práce: **27. května 2021**



Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan





Doc. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 9. října 2020

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

V Plzni dne 26. května 2021

Morávková Šárka

Bc. Šárka Morávková

Abstrakt

Diplomová práce pojednává o příčinách požárů zaviněných závadami při provozu FVE. První část je zaměřena na úvod do tematiky fotovoltaického průmyslu - funkci FV článků, typy a komponenty fotovoltaických elektráren. Dále je provedena rešerše příčin poruch FVE, které mohou vést k požáru a jsou zde uvedena nejčastěji postižená místa FV systému. Další část je věnována českým legislativním a normativním požadavkům na provoz FVE z hlediska požární bezpečnosti. Na tuto část navazují pokyny pro projektování, revize, diagnostiku a údržbu fotovoltaických elektráren. Tato kapitola je doplněna ukázkou simulací FVE v softwarových programech PVSyst a PV*SOL. Poznatky z provedené rešerše jsou uplatněny v poslední kapitole při analýze stávajícího stavu vybraných FVE pomocí poskytnuté fotodokumentace.

Klíčová slova

FVE, fotovoltaický panel, požár, bezpečnost, normy, legislativa, pokyny, PV*SOL, PVSyst, analýza

Abstract

The diploma thesis deals with the causes of fires caused by defects in the operation of PV power plants. The first part is focused on the introduction to the topic of the photovoltaic industry - the function of PV cells, types and components of photovoltaic power plants. Furthermore, the research of main causes of PV malfunctions that can lead to fire is made and the most frequently affected areas of the PV system are listed here. The next part is devoted to the Czech legislative and normative requirements for the operation of PV power plants in terms of fire safety. This section is followed by the instructions for design, inspection, diagnostics and maintenance of PV power plants. An example of PV power plant simulations in softwares PVSyst and PV*SOL is added to this chapter. The knowledge from the performed research is applied in the last chapter in the form of an analysis of the current state of selected PV power plants using the provided photo documentation.

Key words

PV system, photo-voltaic module, fire, safety, standards, legislation, instructions, PV*SOL, PVSyst, analysis

Poděkování

Ráda bych poděkovala svému vedoucímu diplomové práce Ing. Milanu Bělíkovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

1	Seznam symbolů a zkratek	10
2	Úvod	11
3	Fotovoltaický článek	12
3.1	Křemíkové fotovoltaické panely	12
3.2	V-A charakteristiky fotovoltaického článku	13
4	Fotovoltaická elektrárna	15
4.1	Hlavní komponenty FVE	15
4.1.1	Fotovoltaický panel	15
4.1.2	Střídač	16
4.1.3	Rozvod elektrické energie	17
4.1.4	Akumulátor	17
4.2	Typy FVE	19
4.2.1	Ostrovní systémy	19
4.2.2	Systémy připojené do sítě	20
4.2.3	Hybridní systémy	21
4.2.4	Fotovoltaické parky	22
5	Příčiny poruch FVE	23
5.1	Možné příčiny požárů FVE	24
5.1.1	Elektrické oblouky	24
5.1.2	Zemní spojení	26
5.1.3	Poruchy bypassové diody	27
5.1.4	Porucha vedení	28
5.1.5	Další možné poruchy	29
5.2	Nejčastější výskyt poruch	31
6	Legislativní a normativní požadavky související s požární bezpečností	32
6.1	Legislativa v ČR	32
6.1.1	Zákon o hospodaření energií	33
6.1.2	Zákon o požární ochraně	33
6.1.3	Vyhláška o požární prevenci	33
6.1.4	Vyhláška o technických podmínkách požární ochrany staveb	34
6.1.5	Bojový řád jednotek požární ochrany	35
6.1.5.1	Metodický list 14/N - Nebezpečí úrazu elektrickým proudem	35
6.1.5.2	Metodický list 25/P – Hašení vodou elektrických zařízení a vedení pod napětím do 400 V	37

6.1.5.3	Metodický list 47/P - Požáry střešních konstrukcí s fotovoltaickým systémem	37
6.1.5.4	Metodický list 48/P - Požáry fotovoltaických elektráren	39
6.1.5.5	Metodický list 49/P – Požáry střešních konstrukcí s trubicovým fotovoltaickým systémem	39
6.2	Normy v ČR	39
7	Pokyny pro projektování, revize, diagnostiku a údržbu FVE	41
7.1	Pokyny pro projektování	41
7.1.1	Návrh fotovoltaické elektrárny	41
7.1.2	Technické provedení fotovoltaické elektrárny	42
7.2	Pokyny pro revize	44
7.2.1	Revizní úkony	44
7.2.2	Revize pomocí infračervené kamery	46
7.3	Pokyny pro diagnostiku	47
7.3.1	Monitoring	47
7.3.2	Diagnostika	47
7.4	Pokyny pro údržbu	48
7.5	Simulační programy	49
7.5.1	Simulace FVE	51
7.5.1.1	Zadávání parametrů	51
7.5.1.2	Porovnání výsledků simulací	52
8	Kontrola modelové FVE	57
8.1	Znečištění FV panelů	57
8.2	Vlhkost a působení organismů	58
8.3	Prasklina na panelu	58
8.4	Poruchy kabeláže	59
8.5	Nosná konstrukce	61
9	Závěr	64
	Literatura	66
10	Přílohy	75

1 Seznam symbolů a zkratek

AC	Alternating Current. Střídavý proud.
CAD	Computer Aided Design. Počítačem podporované projektování.
CCD	Charge-Coupled Device. Zařízení s vázanými náboji.
DC	Direct Current. Stejnoseměrný proud.
DoD	Depth of Discharge. Hloubka vybití.
Dv	Bezpečná vzdálenost.
EVA	Etylvinylnacetát.
FV	Fotovoltaický.
FVE	Fotovoltaická elektrárna.
GFCI	Ground-Fault Circuit Interrupter. Přerušovač obvodu zemního spojení.
I_{mp}	Maximum Power Point Current. Proud v bodě maximálního výkonu.
I_{sc}	Short Circuit Current. Zkratový proud.
MPP	Maximum Power Point. Bod maximálního výkonu.
PR	Performance Ratio. Koeficient výkonnosti.
SoC	State of Charge. Stav nabití.
V-A	Volt-Ampérová (charakteristika).
V_{mp}	Maximum Power Point Voltage. Napětí v bodě maximálního výkonu.
V_{oc}	Open Circuit Voltage. Napětí naprázdno.
η	Účinnost [%].

2 Úvod

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na možné příčiny požárů fotovoltaických elektráren. V posledních desetiletích stále roste zájem o obnovitelné zdroje energie, jejichž využití je pro naši planetu klíčové nejen z důvodu nevyčerpatelnosti zásob, ale především díky zpracování, které je šetrné k životnímu prostředí a nezatěžuje Zemi škodlivými látkami, jako tomu je u klasických elektáren. Výhodou fotovoltaických elektráren je jejich jednoduchá konstrukce a poměrně malé množství potřebných komponentů, což umožňuje navrhovat fotovoltaické systémy v jakémkoliv měřítku na prakticky jakémkoliv místě - od malých systémů využívaných pro vlastní spotřebu k velkým solárním parkům. Dostupnost FV systémů však nepřináší pouze přínosy ale i velké množství nevýhod. Mezi největší a potenciálně nejnebezpečnější patří rozhodně možnost vzniku požáru a jeho následné šíření, které zejména v případě instalace FVE na střeších domů mohou mít fatální následky.

Diplomová práce je rozdělena do 6 hlavních částí. Nejprve se v práci věnuji základním druhům fotovoltaických článků a jejich funkci. Druhá část pojednává o typech fotovoltaických elektráren a ve třetí jsou představeny možné příčiny požárů FVE a taktéž jejich nejčastější výskyty. Ve čtvrté části jsou uvedeny nejdůležitější legislativní a normativní zásady v rámci České republiky z hlediska požární bezpečnosti fotovoltaických systémů, současně s metodickými listy Bojového řádu požárních jednotek. Pátá část je věnována praktickým pokynům pro projektování, revize, diagnostiku a údržbu FVE, která je doplněna ukázkou dvou simulací fotovoltaické elektrárny v softwarech PVSyst a PV*SOL. V závěrečné části je provedena kontrola FV elektráren a jsou zde zobrazeny nalezené nedostatky, které ohrožují bezpečný provoz FVE.

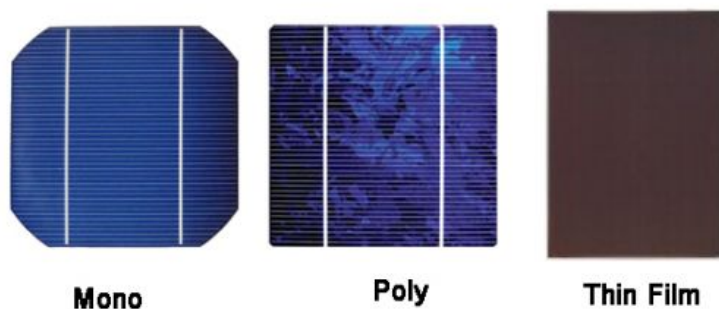
3 Fotovoltaický článek

Energii, dopadající na Zemi ze Slunce, můžeme označit za „čistou“ formu energie a taktéž ji lze zařadit do kategorie obnovitelných zdrojů, jelikož sluneční paprsky neustále dopadají na neodvrácený povrch naší planety. Zvyšování populace na naší planetě představuje hrozbu pro zachování života na Zemi v mnoha ohledech – od klimatických změn, přes hospodářské problémy až k rozdílným sociálním poměrům. Jednou z těchto překážek, které se musí odstranit, popřípadě co nejvíce minimalizovat, pokud chce lidstvo přežít co nejdéle na této planetě, je zajištění potřebného množství elektrické energie pro všechny odběratele, a to především čisté energie, která pochází z obnovitelných zdrojů – tj. vody, větru, biomasy a především ze Slunce. Přeměna sluneční energie na elektrickou je však proces, který má mnoho omezení, a taktéž je doprovázen mnoha riziky, týkajícími se bezpečnosti.

3.1 Křemíkové fotovoltaické panely

Princip přeměny energie ze Slunce na elektrickou energii spočívá ve využití efektu fotovoltaického, resp. fotoelektrického jevu, který se odehrává ve fotovoltaických článcích, jež tvoří strukturu fotovoltaického panelu. Prvek, který je nejčastěji využíván při výrobě těchto článků, je křemík. Jedná se o polovodič hojně se vyskytující v zemské kůře a často užívaný při výrobě skla, porcelánu nebo cementu. V oblasti elektrotechniky lze jmenovat především jeho využití jako základ elektrických součástek - např. diod, tranzistorů či právě fotovoltaických článků.

Dle způsobu formování křemíku lze fotovoltaické panely rozdělit na tři druhy – monokrystalické, polykrystalické a tenkovrstvé (obr. č. 3.1). Z hlediska účinnosti představují nejlepší variantu monokrystalické fotovoltaické panely s η mezi 15 – 22,2 % a životností kolem 25 – 30 let. Monokrystalová struktura dává elektronům více prostoru pro pohyb a vytváří lepší tok elektřiny. Polykrystalické fotovoltaické panely (resp. články) jsou vyráběny jiným způsobem než monokrystalické, a to roztavením mnoha druhů křemíku dohromady. Výsledný materiál dává elektronům menší prostor pro pohyb, takže tento způsob není tak efektivní. Výhodou je ale cena, protože jejich výroba je levnější. Jejich účinnost se pohybuje mezi 12 – 18 % a životnost mezi 23 – 27 lety. Třetím typem jsou tenkovrstvé fotovoltaické panely, které jsou nejméně efektivní (η mezi 9 – 14 %) a jejich životnost se blíží 20 let. Výhodou je jejich využití, jelikož velmi tenkou vrstvu článků lze aplikovat na plast a vytvořit tak flexibilní fotovoltaické panely [2].

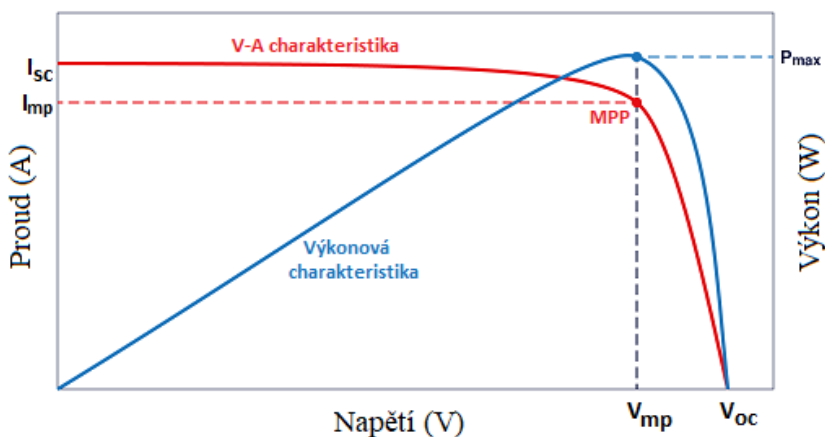


Obr. 3.1: Typy křemíkových fotovoltaických panelů [1]

3.2 V-A charakteristiky fotovoltaického článku

V-A charakteristiky FV článku zobrazují proudové a napěťové křivky a poskytují podrobný popis schopnosti a účinnosti článku přeměnit sluneční energii na elektrickou. Z tohoto důvodu je znalost V-A charakteristik rozhodující pro určení výstupního výkonu a celkové účinnosti celého FV systému a taktéž je široce využívána v diagnostických metodách při kontrolách FVE.

Hlavní elektrické charakteristiky FV článku jsou shrnuty ve vztahu mezi proudem a napětím na typické křivce V-A charakteristiky. Intenzita slunečního záření, která dopadá na FV článek, ovlivňuje velikost proudu, zároveň zvýšení teploty článku snižuje jeho napětí. Na obrázku č. 3.2 je znázorněn graf ukazující charakteristiky proudu a napětí typického křemíkového FV článku, který pracuje za normálních podmínek. Energie dodávaná FV článkem je součinem proudu a napětí, který představuje výslednou křivku charakteristiky.



Obr. 3.2: V-A a výkonová charakteristika fotovoltaického článku, upraveno z [3]

Ve chvíli, kdy FV článek není připojen k žádné zátěži, bude proud na minimu (tzn. roven nule) a napětí na článku bude na maximu – tuto hodnotu nazýváme napětí naprázdno (značena V_{OC} z anglického *Open Circuit Voltage*). Opačný případ nastane ve chvíli, kdy je FV článek zkratován, tj. výstupní konektory jsou spojeny. Napětí na článku bude v tento okamžik nulové, avšak proud tekoucí z článku dosáhne svého maxima. Tento proud označujeme jako zkratový proud (I_{SC} z anglického *Short Circuit Current*). Tyto dvě hodnoty představují počáteční a konečný bod V-A charakteristiky a ač v těchto okamžicích je velikost napětí, resp. proudu maximální, článek samozřejmě negeneruje žádnou elektrickou energii. Uvedené hodnoty, spojující tyto dva extrémy, jsou ale důležité pro nalezení bodu ležícího na křivce, v kterém FV článek generuje maximální výkon. Označujeme jej jako bod maximálního výkonu (MPP z anglického *Maximum Power Point*). MPP fotovoltaického článku leží v blízkosti ohybu křivky V-A charakteristiky a odpovídající hodnoty V_{mp} (napětí v bodě maximálního výkonu) a I_{mp} (proud v bodě maximálního výkonu) lze odhadnout z napětí naprázdno ($V_{mp} \simeq (0.8-0.90) V_{oc}$) a zkratového proudu ($I_{mp} \simeq (0,85-0,95) I_{sc}$). Jelikož výstupní napětí i proud článku závisí na teplotě, skutečný výstupní výkon se bude měnit se změnami okolního prostředí.

V-A charakteristika fotovoltaického panelu závisí na tom, zdali jsou panely propojeny sériově či paralelně (příp. kombinací obou), přičemž v případě sériového propojení se zvyšuje celkové napětí a naopak v případě paralelního spojení se zvyšuje proud [4].

4 Fotovoltaická elektrárna

4.1 Hlavní komponenty FVE

Velmi rychlému rozšíření fotovoltaických systémů po celém světě přispívá i jejich jednoduchost z pohledu množství komponentů. U běžných fotovoltaických elektráren se jedná o:

- fotovoltaické panely,
- střídač,
- rozvaděč elektrické energie,
- kabelové rozvody,
- případně akumulátor.

4.1.1 Fotovoltaický panel

Ať už se jedná o jakýkoliv typ fotovoltaického panelu, zpravidla se skládá z 60 nebo 72 článků, které jsou uspořádány v sério-paralelní kombinaci. Panel je vždy opatřen ochranným hliníkovým nebo duralovým rámem a současně kryt vrstvou temperovaného skla, která slouží jako ochrana před vnějšími vlivy a taktéž jako antireflexní vrstva. Mezi sklem a fotovoltaickými články je umístěna plastová EVA (etylvinylacetát) fólie. Pod články je položena další vrstva EVA fólie a zadní stěna článku je většinou tvořena laminátovou kompozicí PVF-PET-PVF (polyvinylidenfluorid - polyetyléntereftalát - polyvinylidenfluorid) [5].

Důležitým faktorem ovlivňujícím výslednou účinnost fotovoltaické elektrárny je orientace a sklon panelů. Je obecně známo, že ideální umístění je tak, aby byly panely orientovány co nejvíce k jihu a optimální úhel sklonu je udáván mezi 30° až 35°. Výzkumy však dokázaly, že i při vodorovném umístění panelů dojde ke snížení celoročního výnosu elektřiny jen nepatrně nad 10 %. V dnešní době se stále více pozornosti upíná k využití oboustranných fotovoltaických panelů se systémem sledování pohybu Slunce, které dle vědců vyprodukuje v průměru až o 35 % více elektřiny než běžné fixní jednostranné panely [6, 7].

Pro dosažení optimálního sklonu panelů je klíčová nosná konstrukce, na které jsou panely upevněny. Nejrozšířenějším typem jsou konstrukce určené pro sedlové střechy. Tyto jsou vhodné pro malé instalace na rodinné domy zejména pro jejich jednoduchost a nízkou cenu. Nosným prvkem jsou hliníkové rámy, jež jsou ke střeše domu přichyceny speciálními háky. Samotný panel je poté připevněn k nosnému rámu pomocí příchytek. U plochých střech jsou používány konstrukce, které jsou tvořené ocelovými pozinkovanými rámy mající trojúhelníkový tvar a tyto jsou podélně spojené hliníkovým rámem pro uchycení panelů. Celá konstrukce je pak připevněna ke střeše chemickými kotvami nebo zatížena betonovými bloky. Velice jednoduchou alternativou je použití plastových konzol, které jsou vyplněny zátěží (např. pískem či šterkem) a na nich je umístěn panel. Při instalaci elektrárny na volném prostranství se využívá konstrukcí pro ploché střechy s tím rozdílem, že je pevně přichycena k zemi. Posledním typem konstrukcí jsou polohovatelné systémy, které kopírují polohu Slunce, avšak jejich velkou nevýhodou jsou vysoké počáteční náklady [8].

4.1.2 Střídač

Střídač, někdy nazývaný i měnič, slouží k přeměně stejnosměrného napětí, generovaného panely, na napětí střídavé, které je dále distribuováno do rozvodné sítě. Mimo to může mít také spoustu doplňkových funkcí, jako například monitorování sítě, kontrolu provozních údajů anebo třeba ochranu systému.

Nejdůležitějším parametrem, vyjadřujícím kolik energie se ze stejnosměrného vstupu dostane na střídavý výstup, je účinnost. Dělíme ji na maximální a evropskou, přičemž její hodnota souvisí s klimatickými podmínkami a okolní teplotou. Evropská účinnost je průměrem účinností při různých stupních zatížení střídače, díky čemuž jsou výsledné hodnoty reálnější vzhledem k provozním podmínkám zařízení [9].

S klimatickými podmínkami a především s jejich změnou souvisí i další parametr střídače, a tím je účinnost přizpůsobení MPP. Aby byl efekt střídače co nejvyšší, je nutné aby zařízení dokázalo zaregistrovat změnu okolních podmínek v co nejkratším čase a následně adekvátně reagovat. Tuto funkci zastává tzv. *MPP tracker*, který monitoruje bod maximálního výkonu a změnou vstupního odporu zajišťuje optimální chod střídače.

Mezi další důležité parametry můžeme zařadit např. skutečnost, zdali je střídač vybaven transformátorem či nikoliv. Výhodou beztransformátorových střídačů je vyšší efektivita, nevýhodou je pak absence galvanického oddělení, které chrání zařízení před poškozením. Dalším způsobem, jak zlepšit účinnost, je využití několika výkonových

stupňů, kdy v okamžiku částečného zatížení (např. při vysoké oblačnosti) pracuje pouze nižší výkonový stupeň a až v případě změny podmínek přispívají k práci i další stupně.

Vedle klasických střídačů bychom ve fotovoltaických elektrárnách našli i modernější zařízení nazývané mikrostrídače. Jejich funkce je stejná, rozdíl je však ve velikosti a umístění, jelikož ve většině případů jsou tato zařízení situována přímo na panelech. Největší výhodou představují v otázce požární bezpečnosti, protože umožňují odpojit jednotlivé panely v případě poruchy. Nevýhodou je však jejich nižší spolehlivost a účinnost.

Třetím typem střídače, používaným u fotovoltaických elektráren, je střídač pro celý řetězec panelů spolu s výkonovými optimizéry u jednotlivých panelů. Toto uspořádání umožňuje každému panelu vyrábět maximum energie a odstraní tím tak nesoulad panelů, kdy nejslabší panel ovlivňuje výkon celého řetězce panelů v sérii. Výkonový optimizér je DC/DC měnič, který optimalizuje výrobu solární energie pro každý panel sledováním jeho bodu maximálního výkonu [10].

4.1.3 Rozvod elektrické energie

Kabelové rozvody, které na stejnosměrné straně FV systému rozvádějí stejnosměrný proud od přípojníc FV panelů dále do systému, jsou doplněny o jistící prvky, proudové chrániče, přepětové ochrany, atd. Je kladen velký důraz na jejich konstrukci, jelikož musí odolat vnějším vlivům prostředí, jako jsou klimatické změny, teplotní rozdíly či mechanické namáhání.

Rozvaděč elektrické energie je součástí systému, která slouží k rozdělení přívodu elektrické energie na pomocné obvody a zároveň také obsahuje ochranné a jistící prvky. Klíčovým faktorem pro správnou funkci zařízení je zohlednění vnějších vlivů, které mohou ohrozit funkčnost či představovat rizika. Jako u většiny elektrických systémů je hlavním parametrem vliv teploty okolního vzduchu, který v tomto případě může výrazně ovlivnit vypínací charakteristiky jističů [11].

4.1.4 Akumulátor

V případě využití akumulátoru ve FVE k uchování elektrické energie vyprodukované FV panely se zpravidla používají olověné baterie s kapalným či gelovým elektrolytem. Používaný je taktéž modernější typ akumulátoru na bázi lithia [12].

Pro zvolení správného typu akumulátoru je zásadní znát jeho parametry. Mezi ty nejdůležitější patří především kapacita akumulátoru, která je vyjadřována v ampérhodinách. U olověných akumulátorů se tato hodnota pohybuje v rozmezí od 1 do 10 000 Ah. Je nutné dodat, že skutečná velikost kapacity závisí na provozních podmínkách, jako je např. zatížení či teplota [13].

Dalšími parametry, popisující vlastnosti akumulátoru, jsou hodnoty napětí, přičemž každý typ akumulátoru má definovanou základní trojici hodnot napětí, které vycházejí z jeho chemického složení. Jedná se o jmenovité napětí, což je většinou střední hodnota napětí, kterou má akumulátor při vybíjení. Dále je to minimální vybíjecí napětí, jenž značí velikost napětí, na které je možné akumulátor bezpečně vybit až do bodu, kdy by hrozilo jeho nevratné poškození. Pravidelné dosahování této hodnoty však není doporučováno, jelikož při tomto ději dochází ke snižování cyklické životnosti akumulátoru. Poslední ze základní trojice hodnot napětí udávaných výrobcem je maximální nabíjecí napětí, které obdobně jako v předchozím případě, značí maximální velikost napětí, kterého lze bezpečně dosáhnout při nabíjení akumulátoru, aniž by došlo k jeho zničení. U klasických olověných akumulátorů se jmenovitým napětím 12 V se jeho nabíjecí a vybíjecí napětí pohybuje v rozmezí od 10,5 do 14,1 V [14].

Třetím podstatným parametrem akumulátoru je hloubka vybití (DoD z anglického *Depth of Discharge*), jenž vyjadřuje procentuální množství energie, které bylo odebráno z plně nabitých baterie. Tento údaj je důležitý při stanovování počtu vybíjecích cyklů – např. pokud se baterie plně vybíjí (100 % DoD), tak dosáhne 500 cyklů nabití a vybití. Doplnujícím parametrem k DoD je stav nabití (SoC z anglického *State of Charge*), který vyjadřuje množství energie v akumulátoru. Obecně můžeme říct, že čím hlouběji akumulátor vybíjíme, tím méně zvládne cyklů. Proto je vhodnější použít akumulátor s větší kapacitou a nevybíjet jej příliš hluboko [15].

Dále je nutné zmínit samotnou životnost akumulátoru, která je většinou definována počtem plných cyklů vybití a nabití akumulátoru až do poklesu jmenovité kapacity na 80 % své původní hodnoty. Tento údaj je stanoven výrobcem. Jelikož je akumulátor elektro-chemický systém, významnou roli v jeho životnosti představují okolní podmínky, především teplota. Vysoké teploty přispívají k lepšímu průběhu chemických reakcí, čímž umožňují efektivnější využití kapacity akumulátoru. Naopak však zrychlují samovybití, degradaci systému či korozi. Optimální rozmezí pracovních teplot pro většinu typů akumulátorů je od 15 do 35 °C [16].

V neposlední řadě je nutné věnovat pozornost samovybíjení akumulátoru. Jedná se o stav, kdy se akumulátor vybíjí, aniž by k němu byl připojen spotřebič. V důsledku toho může dojít ke snížení celkové kapacity, poklesu výkonu a následně i ke zkrácení životnosti akumulátoru. U olověných akumulátorů dosahuje hodnota samovybíjení od 6 do 8 % úbytku kapacity za měsíc, což je nejvíce ze všech typů akumulátorů. Doporučuje se proto před skladováním akumulátory plně nabít a taktéž je udržovat v prostoru s nižšími teplotami [17].

Při provozu FVE s instalovaným akumulátorem je velice důležitým faktorem celková bezpečnost systému. Zásadním parametrem, z hlediska ochrany před úrazem elektrickým proudem, je maximální bezpečné napětí, které je ovlivněno okolním prostředím. V případě stejnosměrných systémů je bezpečná hodnota napětí živých částí 60 V (v krajním případě – např. při poruše - až 120 V), avšak ve chvíli, kdy se nacházíme v tzv. zvláště nebezpečných prostorech, kterými mohou být např. vlhká a stísněná místa, je hodnota maximálního přípustného napětí při poruše 25 V a současně je zakázán dotyk se živými částmi. U systémů s napětím vyšším než 28 V je nutné pro zachování bezpečnosti instalovat opatření pro zhasnutí oblouků, které je v současné době většinou realizováno pomocí bezkontaktních polovodičových spínačů [14].

4.2 Typy FVE

Fotovoltaické elektrárny nacházejí široké využití po celém světě nejen jako součást energetických soustav, ale i pro vlastní spotřebu instalací na střechy rodinných domů či továren. Obecně můžeme rozlišit čtyři základní typy instalací – ostrovní systémy, systémy připojené do sítě, hybridní systémy a fotovoltaické parky.

4.2.1 Ostrovní systémy

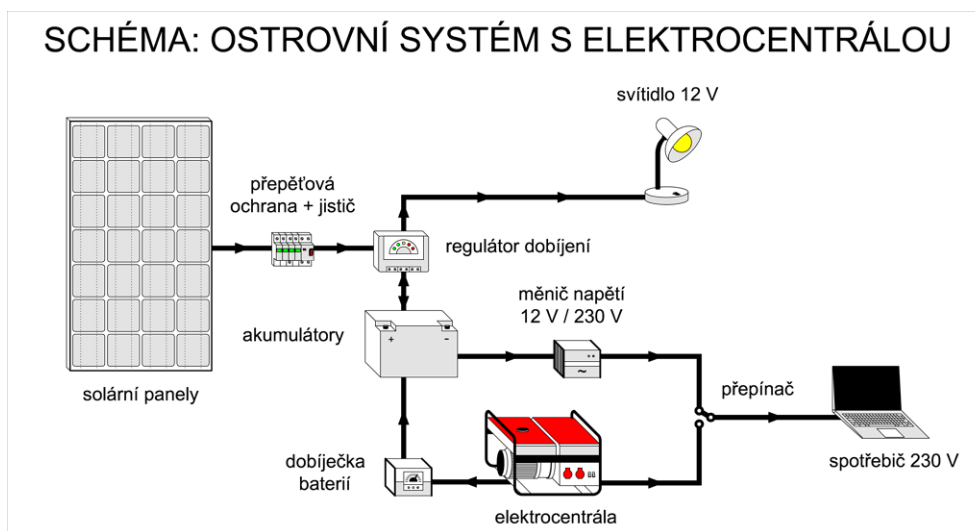
Jde o systém, jenž není napojen na distribuční síť a obsahuje akumulátory. Často je také označován jako off-grid. Tento systém je vhodné využít v místech, kde není k dispozici přístup k distribuční síti nebo by realizování připojení bylo příliš nákladné. Obecně mají ostrovní systémy tendenci být menšího rozsahu než jiné typy FVE, většinou jsou používány pro malé projekty ve venkovských oblastech a v domácnostech.

Princip ostrovního systému je takový, že fotovoltaický panel je zapojen přes ochranné prvky do regulátoru dobíjení, který slouží k řízení dobíjecího napětí a proudu z panelu tak, aby splňoval předepsané hodnoty nabíjení akumulátoru, ke kterému je připojen. Dále jsou na regulátor taktéž připojeny spotřebiče pracující na stejnosměrný proud a

napětí 12, 24 a 48 V. V případě potřeby lze do ostrovního systému nainstalovat střídač, který dovolí využít i spotřebiče, které vyžadují střídavý proud a napětí 230 V [18].

Jak již bylo zmíněno, nejdůležitějším komponentem ostrovního systému je akumulátor. V dnešní době je nejvíce využívaným typem olovený akumulátor, avšak ne klasická startovací autobaterie, nýbrž tzv. trakční baterie. Její výhodou je vysoká odolnost při opakovaném hlubokém vybíjení, čehož je dosaženo upravenou konstrukcí, kde vnitřní olovené elektrody jsou silnější než u autobaterií. Další variantou je pak akumulátor na bázi lithia (nejčastěji lithium-železo-fosfát nebo lithium-ion), který je sice dražší, avšak odolnější vůči kolísání teplot a taktéž snese vyšší nabíjecí a vybíjecí proudy [19, 20].

Nevýhodou ostrovního systému je závislost na intenzitě slunečního záření, které zejména v zimních měsících nemusí být dostačující pro poskytnutí potřebného množství elektrické energie. Proto je vhodné do systému zařadit elektrocentrálu, která se připojuje na baterii přes klasickou dobíječku, jež střídavý proud transformuje na stejnosměrný. Princip ostrovního systému s elektrocentrálou je zobrazen na obr. č. 4.1 [20].



Obr. 4.1: Schéma zapojení ostrovního systému s elektrocentrálou [20]

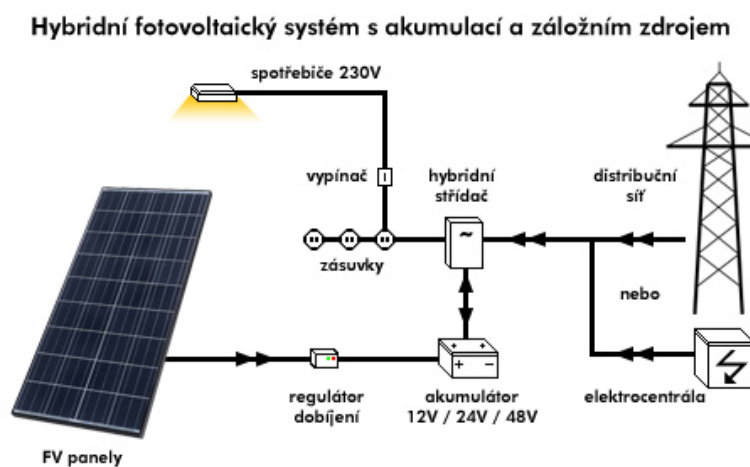
4.2.2 Systémy připojené do sítě

Tento systém se liší od systému off-grid tím, že je bez akumulátoru a síťové systémy jsou zapojeny do distribuční elektrické sítě pomocí střídačů. Systém pracuje současně s distribuční sítí a případný přebytek energie je uvolňován do této sítě. Naopak, pokud je potřeba většího množství odebrané energie než dokáže daná FV elektrárna poskytnout, lze z distribuční sítě energii čerpat [18].

Výhodou těchto systémů jsou jejich nízké náklady, protože k jejich použití je potřeba relativně málo komponent. Za nevýhodu však můžeme považovat riziko výpadku napájení, které zapříčiní jak odpojení od sítě tak i samotného fotovoltaického systému. Odpojením FV systému je eliminováno nebezpečí aktivního zdroje napájení a je tak možné bezpečně provést opravu poškozeného místa sítě [21].

4.2.3 Hybridní systémy

Kombinací ostrovního systému a klasické fotovoltaické elektrárny připojené do distribuční sítě je tzv. hybridní fotovoltaická elektrárna (obr. č. 4.2), která využívá výhod obou typů. Klíčovým prvkem systému je akumulátor, který vyrovnává rozdíly mezi aktuální potřebou elektrické energie a výrobou z fotovoltaických panelů. Princip je takový, že veškerá potřebná energie je brána z nainstalovaného fotovoltaického systému a jen pokud je spotřeba vyšší než výroba, nebo v případě vybití akumulátorů, začne střídač automaticky odebírat elektrickou energii ze sítě.

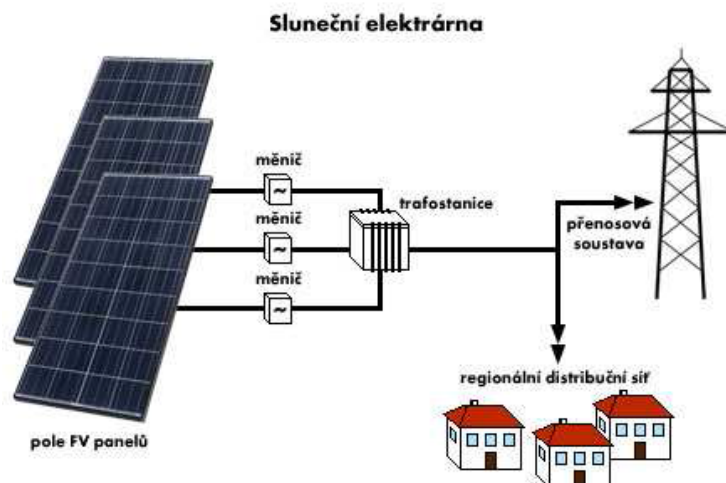


Obr. 4.2: Schéma zapojení hybridního systému [22]

Výhodou hybridního systému je galvanické oddělení samotné elektrárny od distribuční sítě, což má za následek nucené spotřebování veškeré vyrobené energie v místě nainstalované elektrárny. V případě přebytku vyrobené energie, kterou již systém není schopen spotřebovat, přesměruje hybridní měnič energii do dodatečných spotřebičů nebo systém plynule omezí výrobu fotovoltaických panelů. Žádná nadbytečná energie se tak nedostane do sítě. Další výhodou hybridního systému je i nezávislost na síti, kdy při výpadku dodávky energie tento systém zajišťuje okamžitý přechod na provoz ze zásob v akumulátoru [23, 24].

4.2.4 Fotovoltaické parky

Název "fotovoltaické parky" je používán pro FV elektrárny velkého výkonu – většinou vyšším než 500 kW. Obvykle jsou tyto parky tvořeny tisíci FV panely, několika vysokokapacitními centrálními střídači a ve většině případů i trafostanicí pro zesílení výstupního napětí. Princip fotovoltaického parku je znázorněn na obr. č. 4.3.



Obr. 4.3: Schéma zapojení fotovoltaického parku [25]

Mezi největší fotovoltaické parky na světě patří Bhadla v Indii s kapacitou 2,245 MW a plochou 57 km². Tento FV park předčil dosud největší park Pavagada, který se nachází taktéž v Indii a disponuje kapacitou 2,050 MW na ploše 53 km². Největším evropským fotovoltaickým parkem je Núñez de Balboa ve Španělsku s kapacitou 500 MW a plochou 10 km². V České republice bychom největší FV park našli u Ralska, kde stojí elektrárna Ralsko Ra 1 s instalovaným výkonem 28,3 MW.

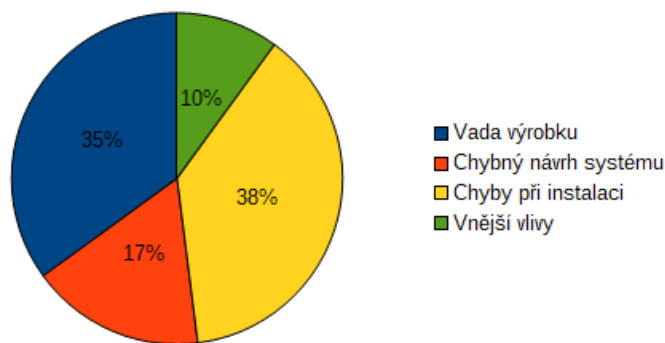
5 Příčiny poruch FVE

Rychlý růst fotovoltaického průmyslu a taktéž stále zvyšující se hrozba vyčerpání neobnovitelných zdrojů energie v posledních několika letech rozšířily význam použití fotovoltaických systémů. Výzkumné týmy odborníků se snaží vynalézt nejen nejúčinnější FV panely, ale taktéž nejbezpečnější, jelikož se jedná o systém skládající se z elektrických zařízení, která sama o sobě představují určitá bezpečnostní rizika.

V této kapitole se budu věnovat poruchám při provozu, jež přímo ovlivňují účinnost FV systémů. Pro dosažení optimálního výkonu je zapotřebí zajistit, aby celý systém vždy fungoval v nejvýhodnějších výstupních podmínkách, avšak kvůli poruchám na zařízení k tomu často nedochází. Většina z těchto poruch zůstává nezjištěna po dlouhou dobu, což má za následek ztrátu výkonu resp. energie. Proto je detekce a analýza poruch v FV systémech zásadním krokem k eliminaci nebezpečných a nežádoucích situací vznikajících při provozu FVE.

Jak lze vidět na obr. č. 5.1, nejčastější příčinou vzniku problémů fotovoltaických systémů jsou chyby či nesprávný postup při jejich instalaci, což je způsobeno lidským faktorem. Mezi takovéto chyby můžeme zařadit např.:

- špatné napojení konektorů,
- nedostatečné nebo žádné odlehčení kabeláže (mechanické přetěžování svorek),
- nedostatečné odizolování kabelových přípojí,
- nedostatečné utažení svorkovnic a šroubových spojů [12].



Obr. 5.1: Problémové oblasti u FVE

Další častou příčinou jsou vady komponentů, mezi které patří např. vady při výrobě, nevhodně vybrané materiálové složení nebo nesprávně zvolený design. Tyto nedostatky se většinou projevují u samotných fotovoltaických panelů.

Dalším problémem pak může být i nevhodný návrh celého systému, jako např. špatné umístění pojistek, nevhodně zvolené komponenty, poddimenzované kabely, atd.

Poslední, nejméně častou, avšak podstatnou problémovou oblastí FV systémů, jsou vnější vlivy. Tyto problémy zapříčiňují především vlivy vznikající působením atmosférických jevů (zásah bleskem, vlhké prostředí, atd.) nebo jakákoliv mechanická poškození způsobená lidmi či zvířaty [12].

Je nutné však zdůraznit fakt, že FV systémy jsou za normálních provozních podmínek extrémně bezpečné, pokud jsou instalovány a udržovány odborníky v souladu s elektrickými předpisy a směrnicemi. Taktéž je nutné říci, že ve chvíli, kdy je FV systém zatížen určitou chybou, neznamená to automaticky bezpečnostní riziko. Ve většině případů poruch musí dojít ke kombinaci několika příčin za specifických podmínek.

V další části kapitoly se budu zabývat nejčastějšími poruchami způsobenými elektrickým proudem.

5.1 Možné příčiny požárů FVE

Hlavním bezpečnostním rizikem fotovoltaických systémů je bezpochyby hořlavost samotných modulů. Je obecně známo, že jakékoliv zařízení, kterým protéká elektrický proud, je potenciálním zdrojem rizika požáru. Ve většině případů za vznikem požáru stojí přetížení určité části či komponentu systému, což vede k následnému zahřívání tohoto místa a zvyšování elektrického odporu vodičů. Pokud teplota dosáhne tak vysoké hodnoty, že dojde k tavení izolace, je riziko vzniku požáru opravdu vysoké.

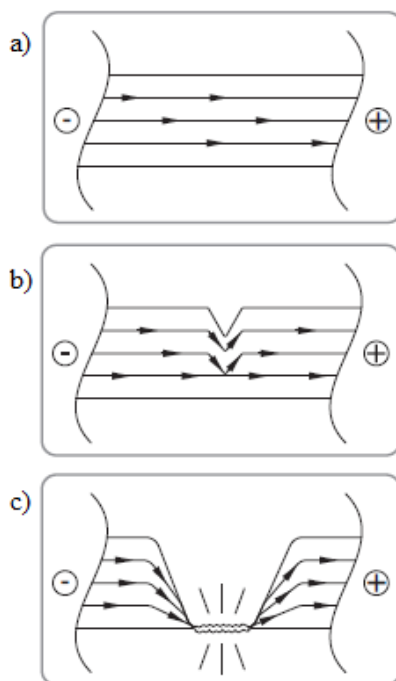
5.1.1 Elektrické oblouky

Primární příčinou fotovoltaických požárů je elektrický oblouk, ke kterému dochází na vedení stejnosměrného proudu vysokého napětí. Běžně se ve FV systému vyskytují dva typy oblouku:

- sériový (porucha v sérii s připojenou zátěží, dochází k přerušení spojení vodičů),
- paralelní (porucha izolace mezi vodiči).

Při poruše, způsobené sériovým obloukem, je vodič přerušen, čímž se vytvoří mezera ve vodivé cestě, zatímco teče proud. Tím je vytvořena jiskra, která ionizuje okolní vzduch a produkuje plazmu. Pokud je proud dostatečně vysoký, vytvoří se takové množství plazmy, které umožní téci proudu přes mezeru ve vodivé cestě.

Na obr. č. 5.2 a) je znázorněn neporušený vodič, kde tok proudu není ničím narušen. Obr. č. 5.2 b) ukazuje poškození ve vodiči, které zvyšuje jeho odpor, a tím i proudovou hustotu. Dochází k nárůstu teploty vodiče a jeho možnému roztavení. Na obr. č. 5.2 c) je zobrazen přerušovaný vodič, kde došlo k poruše spojitosti. Vodič je zničen teplem a díky ionizaci dochází ke vzniku plazmy v okolí poruchy. Při dostatečně velkém proudu je možné vidět elektrický oblouk [26].



Obr. 5.2: Vznik elektrického oblouku [26]

Teplota elektrického oblouku závisí na řadě faktorů např. na úrovni toku proudu. Na typickém FV systému je elektrický oblouk ve většině případech tak horký, že by dokázal roztavit sklo, měď a hliník a způsobit spalování okolních materiálů. Oblouk tak bude přetrvávat, dokud nebude vypnuto napětí nebo se nezvětší vzdálenost kontaktů, mezi kterými se vytváří oblouk [27–29].

Příčinou vzniku elektrického oblouku ve FV systémech jsou většinou vadné součásti, chyby při instalaci zařízení či mechanické poškození a stárnutí komponent. Velmi častým problémem je vnikání vlhkosti do zařízení, která následně způsobuje degradaci spojení konektorů, dále spojování nekompatibilních součástí, špatně spájené spoje ve

spojovací skříňce FV modulu, poškozené nebo odřené vodiče, atd. [30].

V mnoha případech se většina poruch vyskytla na stejnosměrné straně obvodu (ve FV modulech, ve stejnosměrném vedení, ve stejnosměrných izolátorech atd.). Důvodem, proč elektrický oblouk není v systémech střídavého proudu problémem je to, že oblouky mají tendenci se samy zhasět při střídání napětí, které prochází standardním napájením ze sítě 100krát za sekundu. To znamená, že aby byl oblouk soběstačný, musí být podmínky pro spuštění oblouku trvale přítomny. Naproti tomu na stejnosměrné straně systému zůstává napětí na stálé hodnotě a po vytvoření oblouku má tendenci podporovat jeho pokračování. Proto je ve FV systému nezbytná náležitá ochrana před vznikem elektrického oblouku, aby se zabránilo vážným nebezpečím požáru. Vzhledem ke své náhodnosti, chaotické a přerušované povaze je velmi obtížné oblouky detekovat [29–31].

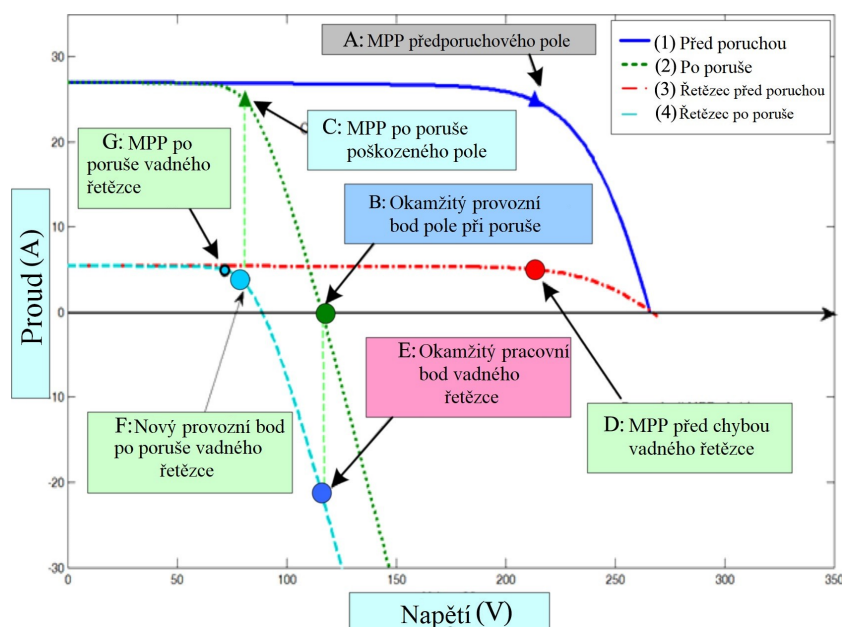
5.1.2 Zemní spojení

Z důvodu ochrany uživatelů před možným úrazem elektrickým proudem jsou části FV pole, které nesou proud, tj. kovové části, obvykle uzemněny pomocí uzemňovacích vodičů. Jakékoli náhodné spojení mezi těmito a proudovými vodiči ve FV poli vede k rychlému a nepřetržitému toku proudu do země; který se často označuje jako zemní spojení.

K zajištění stanovené bezpečnosti a k zabránění potenciálnímu vzniku rizika přehřátí částí FV systému, které mohou vést až k požáru, je nutné detekovat a izolovat zemní poruchy. Na základě použité instalace systému rozlišujeme dva typy - uzemněné a neuzemněné FV systémy. U obou způsobů jsou kovové části uzemněny. Rozdíl je v zajištění ochrany při poruše – zatímco uzemněné systémy mají živé spojení mezi uzemňovacím vodičem a proudovým vodičem pomocí pojistky GFCI (z anglického *Ground-Fault Circuit Interrupter*, tj. přerušovač obvodu zemního spojení), u neuzemněných systémů je ochrana realizována pomocí vhodných zemnicích elektrod společně se zařízením pro sledování zbytkového proudu.

Bez ohledu na počet použitých ochranných zařízení se ochrana zemních poruch může někdy stát náročným úkolem, jelikož reakce systému na poruchy může v určitých případech vyvolat nežádoucí odezvu (např. snížení velikosti poruchového proudu v důsledku odezvy MPP), která následně oklame činnost pojistek a ochranných zařízení a v mnoha případech tak zemní porucha může zůstat nezjištěna.

Nepřerušované zemní spojení ve FV poli bezpochyby vyvolává změny také v elektrických charakteristikách FV systému. Anomálie přítomné ve V-A charakteristice v důsledku zemního spojení jsou znázorněny na obr. č. 5.3, kde je zobrazeno sedm charakteristických provozních bodů „A-F“. V okamžiku poruchy se provozní bod pole a vadného řetězce okamžitě změní na bod B, respektive na bod E; kde je proud pole nulový a proud řetězce je záporný kvůli silnému zpětnému proudu. Kdykoli dojde k poklesu výkonu, MPP se pokusí optimalizovat pracovní bod tak, aby bylo možné dodat maximální výkon. Výsledkem je, že MPP snižuje provozní napětí FV pole tak, aby pracovalo v bodě MPP po poruše (bod C). Současně je také optimalizován pracovní bod vadného řetězce tak, aby pracoval v bodě F, takže proud řetězce zůstává kladný. Je také zřejmé, že změna pracovního bodu vede k obrovskému snížení výkonu, který je se současným snížením provozního napětí indikátorem zemních poruch [29].



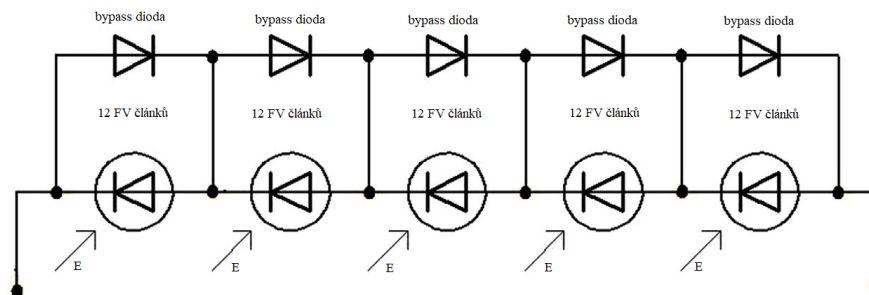
Obr. 5.3: Reakce V-A charakteristiky na nezjištěnou zemní poruchu, upraveno z [29]

V případě zemního spojení musí příslušný orgán provádějící opravu dbát extrémní opatrnosti, jelikož se může stát, že některé součásti FV systému budou pod napětím. Případný kontakt s těmito částmi by mohl vést k velmi těžkým poraněním či v krajním případě i smrti způsobené úrazem elektrickým proudem [32].

5.1.3 Poruchy bypassové diody

Další velmi častou poruchou, která nastává při provozu fotovoltaické elektrárny, je proražení, nebo v extrémním případě i vyhoření bypassové diody neboli překlenovací diody. Tato polovodičová součástka je součástí FV modulu a chrání jednotlivé články před zničením způsobeným značným zahříváním. Schéma zapojení bypassových diod

ve fotovoltaickém panelu se šedesáti články je znázorněno na obr. č. 5.4.



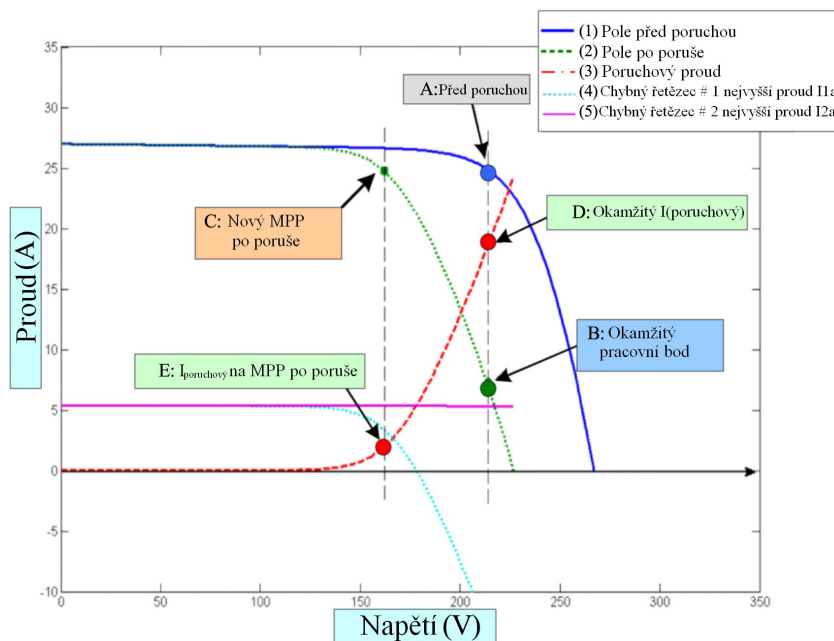
Obr. 5.4: Bypassové diody ve FV panelu se šedesáti články, upraveno z [33]

Úkolem bypassových diod ve fotovoltaickém systému je odpojit tu část panelu, která je méně osvětlena či úplně zastíněna. V okamžiku, kdy napětí neosvětlených článků je rovno součtu napětí článků osvětlených a napětí diody, přechází bypassové diody do propustného směru a umožňují tak průchod elektrického proudu většího, než je zkratový proud zastíněných článků. Zabraňují tak změně, kdy neosvětlované články přestávají být zdrojem elektrické energie a začínají se chovat jako spotřebič. Jelikož jsou fotovoltaické články spojeny sériově, musí jimi protékat stejně velký proud a tím pádem ve chvíli, kdy dojde k poruše bypassové diody, se nezastíněné články začnou značně zahřívat v důsledku průchodu proudu, což může způsobit vznik tzv. horkých míst (hot spots), která vedou v nejhorších případech i k požáru [33–35].

5.1.4 Porucha vedení

Porucha vedení je nejméně častým typem poruch, avšak velikost poruchového proudu vedení může být tak vysoká, že může poškodit FV panely a vodiče, což zvyšuje riziko vzniku požáru a oslabuje celkovou účinnost FV systému. K poruše dochází v okamžiku spojení dvou bodů s různým potenciálem, přičemž ve FV systémech je tato porucha obvykle definována jako zkrat mezi FV panely nebo vodiči pole s různým potenciálem [36].

Podobně jako u zemních spojení vede nezjištěná porucha vedení také ke značné změně V-A charakteristik FV pole, jak je znázorněno na obr. č. 5.5. Je vidět, že přítomnost MPP snižuje vliv poruchy vedení optimalizací pracovního bodu FV pole po poruše do bodu C s významným snížením výkonu a provozního napětí. Je také zřejmé, že v bodě C dochází k podstatnému snížení velikosti poruchového proudu. Nejdůležitější je, že jak zemní poruchy, tak poruchy vedení, indukují podobné změny elektrických charakteristik; takže je velmi obtížné rozlišovat mezi těmito dvěma, zejména v případech, kdy ochranná zařízení tyto poruchy nezjistí [29].



Obr. 5.5: Reakce V-A charakteristiky na nezjištěnou poruchu vedení, upraveno z [29]

Příčinou vzniku poruchy vedení je opět selhání izolace vodičů, dále pak náhodný zkrat mezi vodiči nesoucími proud či poruchy vedení uvnitř rozvodné skříně [36].

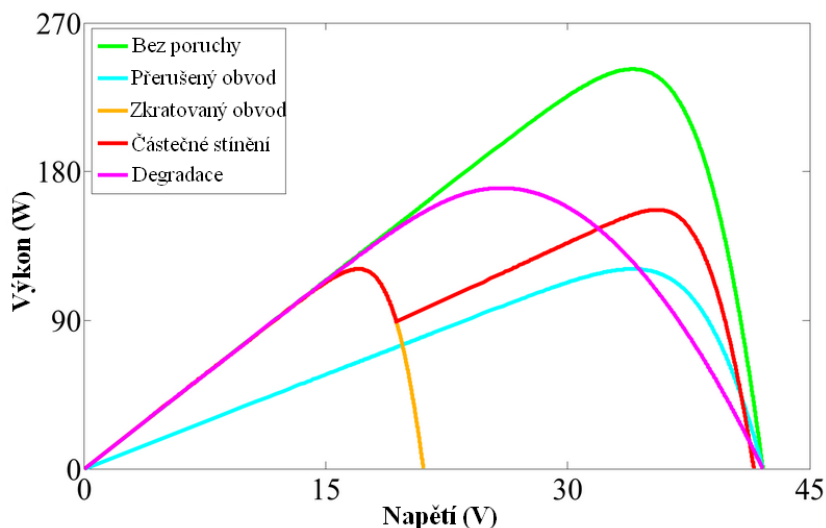
5.1.5 Další možné poruchy

Méně časté a méně závažné poruchy, ke kterým dochází výhradně na stejnosměrné straně FV systému, jsou **zkrat a přerušení obvodu**. Následkem těchto poruch je kromě nesprávně pracujícího zařízení také vznik horkých míst, v důsledku zahřívání vodičů v místě závady, které mohou vést ke vzniku požáru.

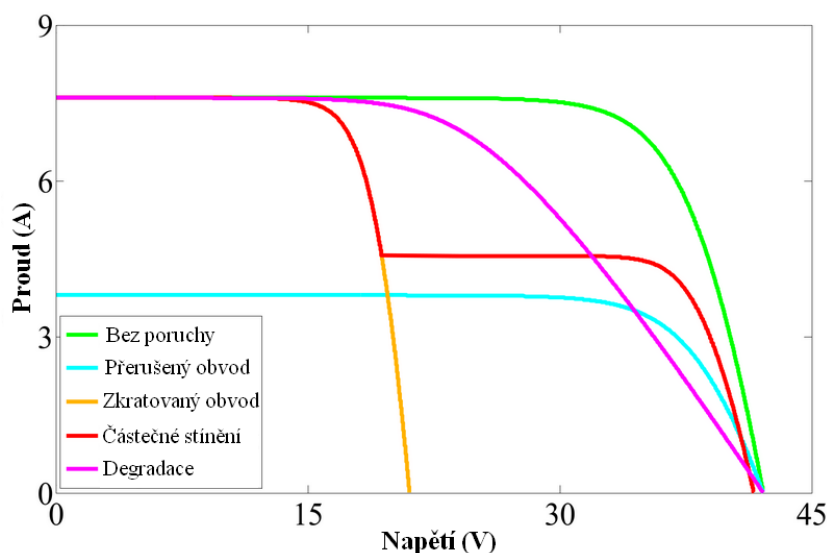
Nejčastější poruchy, které samy o sobě nejsou výsledkem působení elektrického proudu a ve většině případů nejsou přímou příčinou vzniku požáru, avšak za určitých podmínek či v kombinaci s jinými závadami mohou představovat velké bezpečnostní a požární riziko, jsou především poruchy způsobené částečným **stíněním a degradací**. Částečné stínění je jev, při kterém FV pole přijímá nerovnoměrné ozáření a teplotu, což může být způsobeno procházejícím mrakem, přilehlými budovami, stromy atd. Degradace FV článků má mnoho podob – stárnutí, průnik vlhkosti, delaminace (oddělování jednotlivých vrstev panelu, což má za následek vznik dutin a bublin) nebo např. vznik tzv. šnečích cestiček (z anglického *Snail Trails*), které jsou způsobeny mikrotrhlinami ve fotovoltaickém článku [37, 38].

Na obr. č. 5.6 resp. č. 5.7 jsou vyobrazeny grafy znázorňující vliv těchto poruch na výslednou výkonovou, resp. V-A charakteristiku. Lze vidět, že v přerušném obvodu

zkratový proud FV pole významně poklesne, přičemž v případě poruchy způsobené zkratem naopak rychle klesá napětí naprázdno. Když je FV pole částečně zastíněno, I_{mp} evidentně klesá, ale I_{SC} a V_{OC} jsou v zásadě neměnné. Při degradaci proud, resp. napětí v bodě maximálního výkonu se sníží ve srovnání s bezporuchovým stavem a hodnoty zkratového proudu i napětí naprázdna zůstávají opět nezměněny [38].



Obr. 5.6: Výkonová charakteristika, upraveno z [38]



Obr. 5.7: V-A charakteristika, upraveno z [38]

5.2 Nejčastější výskyt poruch

Dle průzkumu, který provedli výzkumníci z BRE Národního solárního centra [30], se jako nejčastější prvek FV systému, kde dochází ke vzniku požáru, jeví izolátor stejnosměrného proudu. Ve většině zaznamenaných případů byl požár způsoben chybnou instalací izolátoru, což umožnilo proniknutí vlhkosti z vnějšího prostředí do zařízení a následně zamezení správného chodu izolátoru. Další příčinou poruch je nepravdělná údržba prvku, kterou mnoho výrobců izolátorů stejnosměrného proudu nařizuje alespoň jednou ročně.

Druhým nejčastěji poruchovým prvkem jsou DC konektory a opět se ve většině případů jednalo o špatné zapojení. K minimalizaci vzniku elektrického oblouku, jež vzniká důsledkem špatného propojení DC konektorů, je důležité, aby všechny kontaktní plochy byly vázány pevně a bez vzduchových mezer. Významný problém nastává ve chvíli, kdy se při instalaci FV systému používají konektory od různých výrobců. Jelikož jsou konektory vyráběny s určitou tolerancí, může toto následně vést k nedokonalému propojení a potenciálnímu riziku.

Nejméně poruchový prvek, alespoň dle průzkumu BRE, je střídač. Výzkumníci ve své zprávě toto tvrzení dokazují teorií, že vzhledem k úrovni technické propracovanosti a bezpečnostním prvkům zabudovaným do tohoto zařízení, je střídač jedním z nejbezpečnějších součástí celého FV systému.

Posledním prvkem, kde dochází k většímu množství poruch vedoucích k požáru, je samotný fotovoltaický panel (významnou roli zde opět hraje špatná instalace) anebo způsob jeho upevnění. Zajímavé je zjištění jedné studie [39], která tvrdí, že riziko poškození střech je u systémů integrovaných do střechy (systémy, které jsou součástí střešní krytiny) dvacetkrát vyšší než u systémů namontovaných na střeše (na rámech nad střechou) [30, 40].

6 Legislativní a normativní požadavky související s požární bezpečností

Jak již bylo několikrát zmíněno, fotovoltaické systémy jsou rozšířené ve velkém množství po celém světě a každým rokem roste jejich využití. Pro zajištění správné instalace a následného bezpečného provozu je nutné se při stavbě řídit legislativními a normativními požadavky v dané zemi.

6.1 Legislativa v ČR

Legislativa České republiky, zabývající se touto problematikou, však není příliš rozsáhlá. Fotovoltaické systémy jsou zahrnuty obecně v zákonech týkajících se energií – konkrétně v *zákoně č. 406/2000 Sb., o hospodaření energií*, dále v *zákoně č. 165/2012 Sb., o podporovaných zdrojích energie a o změně některých zákonů* či v *zákoně č. 458/2000 Sb., o podmínkách podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích a o změně některých zákonů (energetický zákon)*. Z vyhlášek, které zahrnují i fotovoltaické systémy, lze jmenovat např. *vyhlášku č. 8/2016 Sb., o podrobnostech udělování licencí pro podnikání v energetických odvětvích*, dále *vyhlášku č. 16/2016 Sb., o podmínkách připojení k elektrizační soustavě* nebo *vyhlášku č. 296/2015 Sb., o technicko-ekonomických parametrech pro stanovení výkupních cen pro výrobu elektřiny a zelených bonusů na teplo a o stanovení doby životnosti výroben elektřiny a výroben tepla z obnovitelných zdrojů energie (vyhláška o technicko-ekonomických parametrech)*.

Legislativní požadavky související s požární bezpečností FVE bychom našli v *zákoně č. 133/1985 Sb., o požární ochraně*. Dalším legislativním prvkem v této oblasti je *vyhláška Ministerstva vnitra č. 246/2001 Sb., o stanovení podmínek požární bezpečnosti a výkonu státního požárního dozoru (vyhláška o požární prevenci)* a taktéž *vyhláška č. 23/2008 Sb., o technických podmínkách požární ochrany staveb*. Posledním důležitým dokumentem v oblasti požární bezpečnosti je *Bojový řád jednotek požární ochrany* vydán pod záštitou Ministerstva vnitra. Jedná se o soubor metodických listů, které obsahují taktické postupy a pokyny generálního ředitele Hasičského záchranného sboru, kterými jsou jednotky požární ochrany povinny se řídit při zásahu.

6.1.1 Zákon o hospodaření energií

Zákon č. 406/2000 Sb., o hospodaření energií stanovuje práva a povinnosti fyzických a právnických osob při nakládání s energií - zejména elektrickou a tepelnou, a dále také s plynem a dalšími palivy. S ohledem na celkovou bezpečnost je nejpodstatnější § 10d, který určuje k provádění instalací vybraných zařízení vyrábějících energii z obnovitelných zdrojů energie jako osobu oprávněnou fyzickou nebo právnickou osobu, která je držitelem živnostenského oprávnění v požadovaném oboru, jenž není starší 5 let. V Národní soustavě kvalifikací je zavedena tato profesní kvalifikace jako elektromontér fotovoltaických systémů. Novela zákona v roce 2015 upravila tuto povinnost pouze na instalace, které využívají některý z dotačních programů – např. nová zelená úsporám [41].

6.1.2 Zákon o požární ochraně

Zákon č. 133/1985 Sb., o požární ochraně zadává každému povinnost konat tak, aby nezapříčinil vznik požáru, který by mohl ohrozit život a zdraví osob a zvířat a poškodit majetek. Dále zákon říká, že při zdolávání požárů a jiných mimořádných událostí je každý povinen poskytnout pomoc, pokud tím neohrozí sebe či blízké osoby.

Zákon mimo jiné taktéž uděluje povinnost právnickým a podnikajícím fyzickým osobám obstarávat požární techniku, prostředky požární ochrany a požárně bezpečnostní zařízení a udržovat je v provozuschopném stavu. Dále jsou povinny vytvářet podmínky pro hašení požárů – tj. udržovat volné příjezdové komunikace, únikové cesty a volný přístup k nouzovým východům či k rozvodným zařízením elektrické energie. Povinností je taktéž pravidelně kontrolovat dodržování předpisů o požární ochraně prostřednictvím odborně způsobilé osoby, technika požární ochrany nebo preventisty požární ochrany. V případě provozování činnosti s vysokým nebo zvýšeným požárním nebezpečím jsou právnické a podnikající fyzické osoby povinny vypracovat dokumentaci zdolávání požárů a nechat ji schválit orgánem státního požárního dozoru. Zároveň jsou v tomto případě povinná pravidelná školení zaměstnanců o požární ochraně [42].

6.1.3 Vyhláška o požární prevenci

Vyhláška Ministerstva vnitra č. 246/2001 Sb., o stanovení podmínek požární bezpečnosti a výkonu státního požárního dozoru (vyhláška o požární prevenci) mimo jiné definuje věcné prostředky požární ochrany a požárně bezpečnostní zařízení. Následně udává pokyny pro jejich umístění, projektování a montáž a taktéž provozování a provádění kontrol, údržeb a oprav. Např. dle § 13 odst. 1) jsou stanoveny lhůty preventivních

požárních prohlídek v zařízeních, kde jsou provozovány činnosti s vysokým požárním nebezpečím, nejméně jednou za 3 měsíce, u činností se zvýšeným požárním nebezpečím nejméně jednou za 6 měsíců a u činností bez zvýšeného požárního nebezpečí nejméně jednou za 12 měsíců.

Zásadním paragrafem této vyhlášky z hlediska fotovoltaického systému je § 18, který definuje prostory a zařízení se složitými podmínkami pro zásah. Navazuje na něj § 34 o dokumentaci zdolávání požárů, jenž definuje pojmy operativní plán a karta. V operativním plánu by měl být uveden základní text s taktickou studií zdolávání požáru a taktéž příloha obsahující textovou část s operativně taktickými údaji o objektu a grafickou část s plánem objektu, včetně umístění okolních objektů, zdrojů vody pro hašení požárů, příjezdových komunikací a nástupních ploch pro požární techniku. Operativní karta je pak zjednodušená verze operativního plánu. Dále je v této vyhlášce určeno, že příloha nebo operativní karta má být umístěna u jednotky hasičského záchranného sboru kraje a podniku.

§ 50 vyhlášky pojednává o postupu zjišťování příčin vzniku požárů a definuje 8 základních bodů. Zjišťuje se:

- místo a doba vzniku požáru,
- osoba, u které požár vznikl,
- příčina vzniku požáru včetně možných verzí,
- okolnosti mající vliv na šíření požáru včetně dodržení podmínek požární bezpečnosti stavby, vyplývajících z ověřené projektové dokumentace,
- následky požáru, jako jsou předběžná způsobená škoda, zraněné a usmrcené osoby,
- výše uchráněných hodnot při hasebním zásahu,
- porušení předpisů o požární ochraně,
- jiné okolnosti nezbytné pro zjištění příčiny vzniku požáru [43].

6.1.4 Vyhláška o technických podmínkách požární ochrany staveb

Vyhláška č. 23/2008 Sb., o technických podmínkách požární ochrany staveb zejména udává pokyny pro navrhování a umístění stavby z hlediska požární bezpečnosti. V pří-

loze č. 3 této vyhlášky je stanovena podmínka pro umístění střídače napětí s odpojovačem ve fotovoltaické elektrárně, kdy je nutné jej instalovat tak, aby stejnosměrná část rozvodu byla co nejkratší. Dále je uvedeno, že fotovoltaické panely umístěné na střeše či fasádě nesmí nijak zamezovat odvětrávání objektu, omezovat provoz a údržbu spalinových cest či jakkoliv bránit činnosti jednotek požární ochrany při zásahu [44].

6.1.5 Bojový řád jednotek požární ochrany

V Bojovém řádu jednotek požární ochrany je celkem 9 kapitol s metodickými listy, ve kterých lze najít pokyny pro všechny možné scénáře související s požárním zásahem. Z hlediska požáru fotovoltaické elektrárny je důležitý metodický list č. 14 z kapitoly N - Nebezpečí úrazu elektrickým proudem. Dále jsou to pak metodické listy v kapitole P, konkrétně č. 25 - Hašení vodou elektrických zařízení a vedení pod napětím do 400 V, č. 47 - Požáry střešních konstrukcí s fotovoltaickým systémem, č. 48 - Požáry fotovoltaických elektráren a č. 49 - Požáry střešních konstrukcí s trubicovým fotovoltaickým systémem.

Na obr. č. 6.1 je zobrazeno hašení požáru fotovoltaických panelů umístěných na střeše budovy. Úmyslně založený požár byl ukázkou zásahu jednotek požární ochrany.



Obr. 6.1: Ukázkový požár střechy budovy s fotovoltaickými panely

6.1.5.1 Metodický list 14/N - Nebezpečí úrazu elektrickým proudem

V metodickém listu č. 14 z kapitoly N - Nebezpečí úrazu elektrickým proudem, jsou uvedeny mimo jiné nejčastější výskyty rizika úrazu elektrickým proudem. Z hle-

diska fotovoltaických systémů jsou to především narušené elektrické rozvody a zdroje elektrické energie (akumulátory, elektrocentrály, atd.). Dále jsou v listu uvedeny tři základní body pro ochranu hasičů před nebezpečím úrazu elektrickým proudem při zásahu. Je nutné zajistit:

- vypnutí elektrického proudu v elektrických zařízeních a vedení, včetně zajištění proti opětovanému nekontrolovanému zapnutí nebo indukci elektrického napětí,
- omezení vstupu do prostoru ochranného pásma,
- použití náležitých hasičských prostředků na hašení zařízení a vedení pod napětím.

Vypnutí elektrického proudu se provádí buď odpojením napájení před zahájením zásahu, kdy nejsou k dispozici potřebné (nevodivé) hasební látky či v případě hašení vodou elektrických zařízení a vedení pod napětím do 400 V (viz kapitola 6.1.5.2). Další možností je vypnutí elektrického proudu vypínačem, přičemž v systému s vysokým a velmi vysokým napětím musí tuto činnost provést odborný pracovník, kdežto u systémů s nízkým napětím tato povinnost není.

Omezení vstupu do prostoru ochranného pásma je v metodickém listu popsáno mimo jiné tabulkou č. 6.1, určující bezpečnou vzdálenost D_v , která definuje maximální možné přiblížení těla pracovníka či předmětu pro zachování bezpečnosti. Zkrácení této vzdálenosti není povoleno pro osoby bez elektrotechnické kvalifikace.

Tab. 6.1: Minimální hodnoty D_v [45]

Střídavé napětí (kV)	Bezpečná vzdálenost D_v (m)
do 1	0,30
nad 1 do 10	1,15
22	1,26
35	1,37
110	2,0
220	3,0
400	4,6

Posledním bodem metodického listu jsou pokyny pro použití vhodných prostředků pro hašení požáru. Pokud elektrické zařízení nelze vypnout a život osob či zvířat je ohrožen, lze požár hasit vhodným nevodivým hasivem. Pokud není stanoveno jinak, zařízení pod nebezpečným elektrickým napětím nelze hasit vodou ani pěnou a použití náležité hasební látky musí odpovídat hodnotě bezpečné vzdálenosti [45].

6.1.5.2 Metodický list 25/P – Hašení vodou elektrických zařízení a vedení pod napětím do 400 V

Hašení vodou elektrických zařízení a vedení pod napětím do 400 V je situace, která nastává pouze ve chvíli, kdy u zásahu nelze využít jiné postupy popsané výše. Je to tedy v případech kdy není možné zajistit odpojení elektrického zařízení a vedení od napětí do 400 V, dále pokud použití jiného hasiva stanového pro hašení pod napětím není možné a taktéž v místech kde není napětí elektrického proudu na elektrickém zařízení nebo vedení vyšší než 400 V.

Další podmínky udává metodický list pro způsob hašení vodou. Je nutné používat pouze kombinované nebo vysokotlaké proudnice, dodržet bezpečnou vzdálenost za minimálního tlaku vody na proudnici a používat viditelně neznečištěnou vodu či vodu se smáčedlem, pěnidlem a jinými příměsemi, které zvyšují kompaktnost proudu nebo vodivost. V dalším bodě pak list definuje bezpečnou vzdálenost jako nejmenší vzdálenost mezi koncem proudnice a hašeným zařízením nebo vedením pod napětím do 400 V. Je dáno, že hasiči nesmí být v přímém kontaktu s vodou (např. ve formě kaluží) nebo vodivými předměty, které jsou spojené s elektrickým zařízením nebo vedením, ve kterém se předpokládá elektrické napětí, jako jsou vodiče či rozvodné skříně. Další podmínkou je viditelnost v místě zásahu, která musí být natolik dostatečná, aby bylo možné dodržet bezpečnou vzdálenost a umožnit přesnou aplikaci hasiva [46].

6.1.5.3 Metodický list 47/P - Požáry střešních konstrukcí s fotovoltaickým systémem

Metodický list č. 47 v kapitole P – Požáry střešních konstrukcí s fotovoltaickým systémem se soustředí na systémy umístěné na střechách obytných budov a disponující výkonem do 10 kWp. Je zde zdůrazněna skutečnost, že generované napětí ve fotovoltaických panelech nelze přerušit dokud je ozařováno světelnými paprsky. To znamená, že stejnosměrná část systému – tj. ta část kabelového rozvodu, která vede od panelů do střídače, představuje podstatně vyšší riziko než střídavá část, kterou lze v případě potřeby odpojit.

Požáry střech obsahujících fotovoltaické systémy jsou dle tohoto listu klasifikovány do tří skupin:

- požár elektroinstalace FV systému – především střídačů (měničů) nebo jistících prvků, které však většinou nejsou součástí konstrukce střechy. K těmto požárům se přistupuje obdobně jako při požáru elektrických zařízení pod napětím,

- požár střešní konstrukce s FV panely a rozvodných kabelů mezi nimi,
- požár budovy, na které je umístěn FV systém.

V další části metodického listu jsou podrobně popsány pokyny pro požární zásah. Při požáru střešní konstrukce s FV panely je nutné zajistit odpojení fotovoltaických panelů od střídače, FV systému od elektrické sítě nebo akumulátorů, dále pak zabránit šíření požáru mimo zasažené části střechy a v těchto místech zahájit požární zásah. Dalším důležitým bodem je ochrana nosné konstrukce střechy, která se provádí ochlazováním a pokud dojde k rozšíření požáru, je nutné v konstrukci tvořit proluky. Při zásahu je důležité nijak nemanipulovat s fotovoltaickými panely a v žádném případě se jich ani jejich částí nedotýkat. Panely jsou vyrobeny z málo hořlavých látek, a proto není nutné je hasit, pokud to situace nevyžaduje. Při požáru budovy, na které je nainstalován fotovoltaický systém, je podstatné zjistit rozsah požáru uvnitř objektu. Ve chvíli, kdy požár zasahuje i do míst, kde se nacházejí hlavní elektrické rozvody, je nutné považovat tato místa za nebezpečná a k zásahu se pak přistupuje jako k požáru elektroinstalace FV systému – tj. použitím nevodivých hasiv, popř. se postupuje dle pokynů pro hašení vodou elektrických zařízení a vedení pod napětím do 400 V (kap. 5.1.5.2). Opět je důležité zajistit odpojení systému od vnější elektrické sítě, akumulátorů a současně i odpojit fotovoltaické panely od sběrného kabelu [47].

Na obr. č. 6.2 jsou zobrazeny fotovoltaické panely poškozené požárem.



Obr. 6.2: Požárem poškozené fotovoltaické panely

6.1.5.4 Metodický list 48/P - Požáry fotovoltaických elektráren

Metodický list č. 48 v kapitole P – Požáry fotovoltaických elektráren řeší zařízení, která jsou instalována na rozlehlých plochách střech či na volném prostranství a disponují výkonem vyšším než 10 kWp. Opět jsou požáry FV elektráren rozděleny do skupin – stejně jako u metodického listu 47/P, s tím rozdílem, že je zde navíc uveden požár travního porostu v oploceném areálu FV elektrárny, což může způsobit porušení izolace kabelů rozvodu proudu, popřípadě ohrožení technologického objektu elektrárny. Pokyny pro zásah při požáru travního porostu jsou obdobné jako u předchozích případů, tedy zajistit odpojení elektrárny od vnější elektrické sítě a dále odpojení panelů od sběrného kabelu, nehasit poškozené panely a ani se k nim významně nepřibližovat. Důležité je zamezit šíření požáru k technologickému objektu, a proto je nutné do těchto míst směřovat největší pozornost při provádění zásahu [48].

6.1.5.5 Metodický list 49/P – Požáry střešních konstrukcí s trubicovým fotovoltaickým systémem

Metodický list č. 49 z kapitoly P - Požáry střešních konstrukcí s trubicovým fotovoltaickým systémem se zaměřuje na zvláštní typ konstrukce FV panelů, kdy polovodičové články jsou umístěny v trubicích. Z hlediska rizika vzniku požáru je rozdílem oproti klasickým deskovým panelům odrazová fólie, která se umísťuje pod FV panely, a může ulehčovat šíření požáru. Uvnitř trubic je silikonový olej, jenž má možnost přispět k šíření požáru v okamžiku praskání FV trubic, kdy je možné, že se tekoucí olej dostane do svodů a netěsností ve střeše. Pokyny pro požární zásah jsou stejné jako při požáru střešní konstrukce s fotovoltaickými panely, s doplněním o ochraně dýchacích cest při manipulaci se zbytky po požáru z důvodu zvýšeného množství karcinogenních látek šířících se do okolí [49].

6.2 Normy v ČR

Stejně jako zákonů, ani norem týkajících se ochrany proti požáru fotovoltaických systémů, bychom v české legislativě mnoho nenašli. Většina je jich pak převzatá z evropských norem.

Technická norma *ČSN EN 62446-1 Fotovoltaické (PV) systémy - Požadavky na zkoušení, dokumentaci a údržbu - Část 1: Systémy spojené s rozvodnou sítí - Dokumentace, zkoušky při uvádění do provozu a kontrola*, se zabývá především dokumentací a revizemi fotovoltaických elektráren. Řeší pouze FV systémy, které jsou napojené na distribuční

sít a neobsahují akumulátory (tzn. nevztahuje se na hybridní systémy). V normě lze najít popis zkoušek, které je nutné provést při uvádění elektrárny do provozu, dále kritéria pro kontrolu a dokumentaci pro ověření správné instalace a bezpečného chodu elektrárny [50].

Další technickou normou je *ČSN EN IEC 61730-1 ed. 2 Způsobilost k bezpečné činnosti fotovoltaických (PV) modulů - Část 1: Požadavky na konstrukci*, jež je zaměřená na základní konstrukční požadavky při instalaci FV modulů. Účelem normy je zajistit dlouhodobě účinný a bezpečný provoz modulů po elektrické i mechanické stránce [51]. Navazuje na ni norma *ČSN EN IEC 61730-2 ed. 2 Způsobilost k bezpečné činnosti fotovoltaických (PV) modulů - Část 2: Požadavky na zkoušení*. V tomto dokumentu jsou uvedeny zkoušky, které je nutné provést pro zajištění bezpečnosti FV modulů, přičemž maximální hodnota stejnosměrného napětí systému je v této normě omezena na 1 500 V [52]. Normy navazují na soubor *ČSN 33 2000* týkající se elektrických instalací nízkého napětí. Konkrétně lze jmenovat normu *ČSN 33 2000-6 ed 2. Elektrické instalace nízkého napětí - Část 6: Revize* či *ČSN 33 2000-7-712 ed. 2 Elektrické instalace nízkého napětí - Část 7-712: Zařízení jednoúčelová a ve zvláštních objektech - Fotovoltaické (PV) systémy* (norma opět neřeší hybridní systémy či s instalovaným akumulátorem) [53, 54].

Norma *ČSN EN 50583-1 Fotovoltaika v budovách - Část 1: Moduly BIPV*, se zaměřuje na vlastnosti fotovoltaických modulů v souvislosti se základními požadavky uvedenými v Evropském nařízení pro konstrukční výrobky CPR 305/2011 a s elektrotechnickými požadavky danými Směrnicí nízkého napětí 2006/95/ES nebo normami CENELEC [55]. Navazuje na ni norma *ČSN EN 50583-2 Fotovoltaika v budovách - Část 2: Systémy BIPV*, jež řeší samotnou montážní konstrukci modulů [56].

Nakonec bych ještě zmínila několik norem, které pojednávají o fotovoltaických systémech – konkrétně *ČSN EN 62109-1 Bezpečnost výkonových měničů pro použití ve výkonových fotovoltaických systémech - Část 1: Všeobecné požadavky*, zaměřující se na minimální požadavky na konstrukci výkonových měničů použitých ve FV systémech z hlediska ochrany před úrazem elektrickým proudem či požáru, a na ní navazující normu *ČSN EN 62109-2 Bezpečnost výkonových měničů pro použití ve výkonových fotovoltaických systémech - Část 2: Zvláštní požadavky pro střídače*, která definuje zvláštní bezpečnostní požadavky střídače, jež vykonává i jiné funkce než pouze základní (měnič) [57, 58]. V souvislosti s požární bezpečností komponentů fotovoltaických elektráren lze jmenovat také normu *ČSN EN 62790 Připojovací skříňky pro fotovoltaické moduly - Bezpečnostní požadavky a zkoušky* [59].

7 Pokyny pro projektování, revize, diagnostiku a údržbu FVE

Jak bylo zmíněno v kapitole 5, nejvíce poruch se ve fotovoltaických systémech vyskytuje z důvodu špatné instalace či chyb vzniklých při projektování. Proto je nezbytně nutné co nejvíce minimalizovat tato rizika zajištěním odborné konzultace při projektování a návrhu fotovoltaické elektrárny.

7.1 Pokyny pro projektování

Obecně lze postup projektování fotovoltaické elektrárny popsat několika kroky:

- předběžné fáze návrhu - výběr vhodného umístění a odborná kontrola,
- návrh fotovoltaického systému,
- podání žádosti o připojení k distribuční síti,
- vyřízení stavebního povolení,
- volba technického provedení [61].

7.1.1 Návrh fotovoltaické elektrárny

Prvním krokem při návrhu fotovoltaické elektrárny je výběr vhodného umístění, ať už na střeše objektu či na volném prostranství, ze kterého plyne určení správné velikosti celého systému. Důležité je zaměřit se na omezení v blízkosti místa plánované FVE, jako jsou např. přilehlé stromy, sloupy vedení či jiné překážky, které mohou zastínit panely. Dále je v případě plánování instalace na střechu domu či průmyslového objektu podstatné ověřit stav střechy, zejména její nosnost. Také je vhodné zvážit, zdali instalování fotovoltaického systému bude vyžadovat jakoukoliv strukturální či elektrickou modernizaci zařízení a místa. Z hlediska správného posouzení všech aspektů, které mohou ovlivnit návrh FVE, je klíčové, aby byla kontrola provedena osobou s potřebnou kvalifikací, jenž následně předloží odborný posudek.

Dalším krokem je určení celkového instalovaného výkonu a taktéž vyhotovení předběžného návrhu fotovoltaického systému na základě poznatků z provedené kontroly. Jedná se nejen o vytvoření přesného výkresu, určujícího umístění jednotlivých částí systému,

ale především o výběr vhodných komponent. Množství fotovoltaických panelů je stanoveno velikostí systému, stejně jako volba jejich ukotvení. Střídač, rozvodné a ochranné prvky či zařízení na měření a monitorování systému, jsou pak dány požadavky uživatele, kdy zároveň významnou roli představují finanční náklady.

V případě instalace fotovoltaické elektrárny, která je připojena k distribuční síti (on-grid či hybridní systém), je pokračujícím krokem podání žádosti o připojení lokálnímu distributorovi elektrické energie. Důležitým legislativním dokumentem je *vyhláška č. 16/2016 Sb., o podmínkách připojení k elektrizační soustavě*, která definuje technické podmínky, jež musí nově instalované odběrné místo splňovat [62] a dále také již výše zmíněný *zákon č. 458/2000 Sb., o podmínkách podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích a o změně některých zákonů (energetický zákon)* [63].

Ať už se jedná o instalaci fotovoltaické elektrárny na střechu vlastního domu či na vlastní pozemek, je nutné se řídit *zákonem č. 183/2006 Sb., o územním plánování a stavebním řádu (stavební zákon)*. Pro instalaci fotovoltaické elektrárny na pozemek v zastavěném území je dle stavebního zákona potřeba územní rozhodnutí. V případě, že výkon instalované FVE nepřesáhne 20 kW, není nutné následné stavební povolení [64].

7.1.2 Technické provedení fotovoltaické elektrárny

Technické provedení se odvíjí od konkrétního návrhu FVE a nelze jej obecně definovat. V dnešní době bychom na trhu našli velké množství fotovoltaických panelů o různých rozměrech i výkonu. Nejlépe hodnocené panely z hlediska instalovaného výkonu se dle [65] pohybují od 250 do 345 W s provozním napětím v rozmezí 30 – 50 V a proudem od 6 do 8 A.

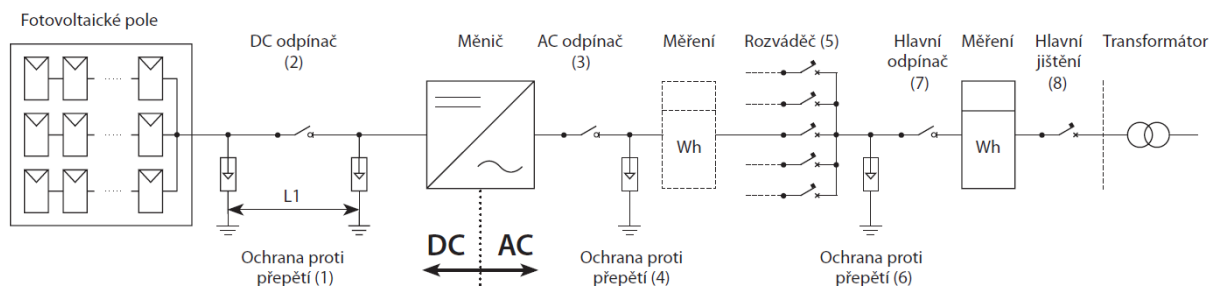
Volba střídače závisí především na velikosti fotovoltaické elektrárny a také na jejím typu. Obecně platí, že velikost střídače (jeho výkon) by měla být stejná jako stejnosměrný jmenovitý výkon FV pole. Pokud je instalována elektrárna s akumulací energie, je důležité aby střídač měl stejné jmenovité napětí jako akumulátor.

Při volbě akumulátoru je doporučeno vybírat baterie s hlubokým cyklem. Jak již bylo řečeno v kapitole 4.1.4, v dnešní době bychom na trhu našli akumulátory olovené a na bázi lithia a volba optimální baterie opět závisí na velikosti a parametrech instalovaného fotovoltaického systému. Akumulátory na bázi lithia mají nízkou míru samovybíjení a jsou menší z hlediska rozměrů, avšak nevýhodou je jejich nižší vodivost a také složitý a nákladný proces recyklace. Klasické olovené akumulátory jsou rozměrnější a mají

nižší životnost, výhodou je však jejich lepší cenová dostupnost. Jak jejich výroba, tak i recyklace je mnohem ekologičtější než u lithiových typů.

Regulátor nabíjení pro fotovoltaické panely je nezbytným prvkem všech off-grid a hybridních FV systémů. Je připojen mezi panelem a akumulátorem a slouží k automatickému a zejména bezpečnému nabíjení akumulátorů energie z panelů. Zároveň slouží jako ochranný prvek.

Na obr. 7.1 je zobrazeno zjednodušené obecné schéma provedení fotovoltaického zdroje, který pracuje paralelně s distribuční sítí. Lze zde vidět základní ochranné prvky systému, jako jsou odpínače na stejnosměrné i střídavé straně a taktéž ochrany proti přepětí.



Obr. 7.1: Obecné schéma fotovoltaického zdroje s ochrannými prvky [66]

Pro zajištění bezpečného provozu fotovoltaické elektrárny je klíčové chránit panely proti účinkům zpětných proudů (zejména tepelným) a taktéž opatřit rozvodné vodiče nadproudovou ochranou, která zamezí, příp. omezí jejich destrukci při vzniklé poruše. Je vhodné umístit svodiče přepětí jak do blízkosti střídače (měniče), tak k FV poli, pro zajištění ochrany proti přepětí. Pro odpojení střídače slouží DC odpínač (odpojí střídač od stejnosměrné strany systému) a AC odpínač (odpojení od střídavé strany). V případě dlouhého vedení je doporučeno za střídač umístit další svodič přepětí a možností je i zapojení měřicího zařízení, které měří elektrickou energii vyrobenou fotovoltaickými panely. Na základě velikosti fotovoltaického systému je následně připojen rozváděč buď přes jeden jistící prvek, nebo v případě větších instalací jsou přes jistící přístroje připojeny jednotlivé paralelní větve FV pole. Následuje opět ochrana při přepětí, kterou zajišťuje svodič přepětí. Dalším prvkem je hlavní odpínač rozváděče, který rozváděč odděluje od měřicího zařízení dodané, popř. i spotřebované elektrické energie. Posledním ochranným prvkem před vstupem do distribuční sítě je hlavní jistící přístroj [66].

7.2 Pokyny pro revize

Pravidelné revize fotovoltaických elektráren jsou důležité nejen z důvodu zajištění správného chodu systému a tím pádem zaručení maximální účinnosti, ale především z důvodu zachování bezpečnosti. Jednotlivé komponenty a díly elektrárny mají různé doby životnosti, jsou namáhány odlišnými typy zatížení a taktéž vystavovány proměnlivým podmínkám. Je proto nutné se řídit pokyny pro revize, které jsou uvedeny v již zmíněné normě *ČSN EN 62446-1 Fotovoltaické (PV) systémy - Požadavky na zkoušení, dokumentaci a údržbu - Část 1: Systémy spojené s rozvodnou sítí - Dokumentace, zkoušky při uvádění do provozu a kontrola, popř. ČSN 33 2000-7-712 ed. 2 Elektrické instalace nízkého napětí - Část 7-712: Zařízení jednoúčelová a ve zvláštních objektech - Fotovoltaické (PV) systémy* či *ČSN 33 2000-6 ed. 2 Elektrické instalace nízkého napětí - Část 6: Revize* [50, 53, 54].

Doporučené pravidelné prohlídky technologie fotovoltaické elektrárny jsou stanoveny jedenkrát za rok a celkové revize pak pravidelně ve dvouletých lhůtách. V českých normách bychom nenašli stanovenou revizní lhůtu pro malé fotovoltaické elektrárny, avšak lze vycházet z normy *ČSN 33 2000-1 ed. 2 Elektrické instalace nízkého napětí - Část 1: Základní hlediska, stanovení základních charakteristik, definice*, která definuje druhy prostředí a určuje revizní lhůty. Těsně na ni navazuje i norma *ČSN 33 1500 Elektrotechnické předpisy, revize elektrických zařízení*, jež stanovuje pro elektrická zařízení provozovaná ve venkovním prostředí čtyřletou revizní lhůtu. Obecně je však doporučováno, aby byly pravidelné kontroly prováděny častěji. Dle normy *ČSN EN 62446-1* musí revize (ať už výchozí před spuštěním provozu nebo pravidelné) provádět osoby znalé, které vlastní kvalifikaci pro provádění revizí [67, 68].

7.2.1 Revizní úkony

Mezi základní úkony prováděné při revizi patří:

- vizuální a fyzická kontrola propojení fotovoltaických panelů, stejnosměrných a střídavých ochranných prvků a rozvodů, nastavení střídače, uzemňovacího obvodu,
- kontrola dokumentace a provedení systému,
- měření izolačních odporů, impedance a parametrů sítě,
- simulování poruchy a vyzkoušení ochrany,
- zpracování revizní zprávy [69].

Norma ČSN EN 62446-1 popisuje jak má vypadat dokumentace k provozované fotovoltaické elektrárně. Je vyžadován seznam všech použitých komponent spolu se štítkovými údaji, dále podrobný popis projektu, datum uvedení do provozu, jméno a sídlo provozovatele. Dále norma požaduje alespoň jednopólové instalační schéma systému, které musí obsahovat popis jednotlivých částí. V dokumentaci je také nutné uvést informace o provádění údržby.

Při kontrole stejnosměrné části systému je důležité prokázat, že jsou všechny použité prvky schopny vést nejvyšší jmenovitý proud při nejvyšším možném napětí. Dále se kontrolují nadproudové ochranné prvky a ověřuje se, zda odpovídají požadovaným předpisům. Taktéž je nutné potvrdit nezávadnost stejnosměrných odpínačů a by-passových diod. Kontrola střídavé části systému spočívá v ověření, že prvky k odpojení střídače v případě poruchy jsou bez závady a že provozní parametry střídače odpovídají předpisům.

Zkoušení instalace je prováděno dle normy ČSN 33 2000-6 ed. 2, která určuje, že použité měřicí zařízení odpovídají požadavkům mezinárodních standardů IEC 61557. V případě použití jiných měřicích přístrojů je nutné zajistit jejich ekvivalentní funkční vlastnosti a především bezpečnost. Norma taktéž zadává pokyny jak postupovat, pokud je při zkoušce zjištěna porucha. Poté, co je závada odstraněna, je nutné opakovat všechny zkoušky, jež předcházely té, při které porucha vznikla v případě, že mohla mít vliv na její výsledek.

Dále je v normě ČSN EN 62446-1 uvedena podoba zprávy o revizi, která musí být vypracována po provedení revizních úkonů. Zpráva musí obsahovat:

- informační údaje popisující fotovoltaický systém,
- seznam kontrolovaných obvodů,
- záznam o prohlídce,
- zaznamenané výsledky zkoušek pro každý zkoušený obvod,
- doporučenou revizní lhůtu,
- podpis všech osob, které se na revizi podílely [70].

7.2.2 Revize pomocí infračervené kamery

Příloha D normy ČSN EN 62446-1 se věnuje podrobnému popisu postupu prohlídky fotovoltaického systému pomocí infračervené kamery, která může být součástí revize či diagnostiky. Účelem této kontroly je nalezení neobvyklých teplotních změn při provozu FV panelů. V případě zjištění těchto změn je možné identifikovat vadný článek, který by mohl vést k poškození a nesprávnému chodu panelů, v krajním případě až vzniku požáru.

Při provádění kontroly pomocí infračervené kamery je vhodné, aby bylo ozáření fotovoltaického pole konstantní a větší než 600 W/m^2 v rovině pole k zajištění průchodu dostatečně velkého proudu pro vznik detekovatelných teplotních změn. Postup je takový, že je kamerou snímán každý panel, nebo v případě velkého systému ta část pole, která vzbuzuje domněnku o možném výskytu porouchaného článku. Doporučuje se věnovat zvýšenou pozornost by-passovým diodám, propojovacím boxům či elektrickým spojům, které statisticky představují nejčastější výskyt poruch. Na obr. č. 7.2 je zobrazeno fotovoltaické pole umístěné na střeše s detekovaným vadným článkem v jednom z panelů.



Obr. 7.2: Revize fotovoltaického pole pomocí infračervené kamery [71]

V normě je upozorněno na fakt, že teplota panelu závisí na okolních podmínkách – zejména intenzitě ozáření, rychlosti větru a teplotě okolního vzduchu. Všechny tyto veličiny se během dne značně mění, a tak nelze stanovit pevnou hodnotu teploty, která dokazuje výskyt poruchy. Je tedy nutné hledat významný rozdíl teplot v panelu při normálním provozu systému, který odhalí lokaci tzv. hot-spotu. Dalším krokem je nalezené místo označit a zaznamenat jeho polohu buď na samotném panelu či jiné části systému nebo na schématu. Následně se provedou příslušné zkoušky k odhalení příčiny

poruchy, přičemž je doporučeno porovnat V-A charakteristiku vadného panelu s V-A charakteristikou panelu bez poruchy [70].

Použití infračervené kamery není limitováno pouze na fotovoltaické panely, lze s její pomocí kontrolovat i rozvodné skříně, střídače, či jiné komponenty systému.

7.3 Pokyny pro diagnostiku

Pro zajištění správného a bezpečného chodu fotovoltaické elektrárny je důležité kontinuálně sledovat jednotlivé komponenty systému, resp. vykazované veličiny. K tomu slouží monitorovací zařízení, která jsou zdrojem dat pro následnou diagnostiku.

7.3.1 Monitoring

Obecně lze monitorování systémů rozdělit na lokální a dálkové. Lokální monitorování je nejjednodušší způsob, jelikož se většinou jedná o odečítání hodnot na displejích komponentů (např. střídače) přímo v místě elektrárny. Dálkové monitorování je prováděno prostřednictvím bezdrátového připojení, popř. připojením k síti. V dnešní době bychom na trhu našli velké množství internetových platforem pro monitorování fotovoltaických systémů – např. Sunny Portal, Logic Energy nebo inAccess Networks [72].

7.3.2 Diagnostika

Základní kroky používané při provádění diagnostiky fotovoltaické elektrárny jsou:

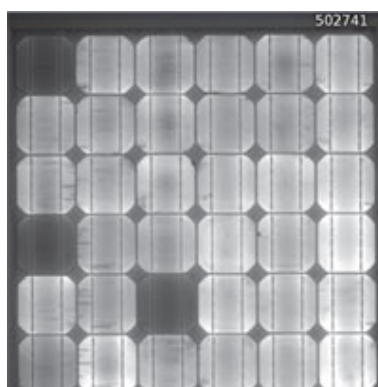
- analýza dat z monitoringu,
- analýza na FVE,
- komplexní analýza v laboratoři,
- zkoušky v klimatické komoře.

Analýza dat z monitoringu. V tomto kroku dochází k odhalení nejzávažnějších chyb a poruch pomocí analýzy statistických dat z komponentů fotovoltaické elektrárny, převážně dat ze střídačů.

Analýza na FVE. V případě nalezení chyby v systému je dále nutné danou poruchu identifikovat a s tím i vadný díl elektrárny. Provádí se vizuální kontrola celé FVE a taktéž analýza stavu panelů, aniž by bylo nutné panely demontovat. Mezi používané

diagnostické metody patří použití termokamery (viz 6.2.2) nebo měření V-A charakteristik panelů, přičemž obě mají tu výhodu, že je možné je provádět přímo na FVE.

Komplexní analýza v laboratoři. Pokud nelze závadu vyřešit či určit na místě FVE, je nutné defektní díl (panel) systému převést do laboratoře k provedení komplexní analýzy. Vedle vizuální kontroly se provádí kontrola metodou elektroluminiscence, což je metoda využívající opačný princip než při analýze termokamerou. Do FV panelu je dodáván proud, který poté vydává záření, jenž je snímáno speciálně upravenou CCD (*Charge-Coupled Device*) kamerou. Výsledkem je obraz (obr. č. 7.3) v odstínech šedi, který ukazuje vadné články, popř. i praskliny [73].



Obr. 7.3: Analýza metodou elektroluminiscence - tmavší místa značí vadný články [74]

Zkoušky v klimatické komoře. Jedná se o metody používané pro stanovení stavu panelů po umělém stárnutí. Postupy vychází z normy ČSN EN 61215-2: *Zemské fotovoltaické (PV) moduly - Posouzení způsobilosti konstrukce a schválení typu - Část 2: Zkušební postupy* a taktéž ČSN EN IEC 61730-2 ed. 2: *Způsobilost k bezpečné činnosti fotovoltaických (PV) modulů - Část 2: Požadavky na zkoušení*. Mezi používané metody patří teplotní cyklování (50 cyklů v rozmezí teplot od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$) pro analýzu teplotní roztažnosti materiálu, dále testování schopnosti panelu odolávat účinkům vysoké teploty a vlhkosti (10 cyklů ve stejném rozpětí teplot) a v neposlední řadě zkouška vlhkým teplem (1000 hodin při $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$), která testuje schopnost panelu odolávat účinkům dlouhodobého pronikání vlhkosti [75].

7.4 Pokyny pro údržbu

Posledním důležitým bodem z hlediska bezpečnosti provozu fotovoltaické elektrárny jsou pokyny pro její údržbu. Nejjednodušší způsob je provádění vizuální kontroly, při které lze odhalit případné nedostatky, jako jsou povolené či zkorodované šrouby, znečištěné panely, uvolněná a nechráněná kabeláž atd. Velice důležitou a často opomíjenou

součástí údržby FVE je taktéž pravidelné čištění filtrů střídačů z důvodu usazování prachových částic, které zvyšují spotřebu energie na chod ventilátorů. V případě umístění FV elektrárny v otevřeném terénu patří mezi základní kroky prováděné při údržbě sečení a úprava travnatého porostu. Při zjištění nedokonalostí je nutné je co nejdříve odstranit, případně podniknout kroky nezbytné pro to, aby se situace již neopakovala.

7.5 Simulační programy

V dnešní době jsou nedílnou součástí projektování fotovoltaické elektrárny softwarové programy, které slouží k podrobné simulaci projektu a usnadnění celého procesu návrhu. Existuje velká řada těchto softwarů, jmenovitě SAM, HOMER, Solarius PV, HelioScope, Solar Pro atd., avšak pro účely této práce jsem se zaměřila pouze na dva – konkrétně PVSyst [76] a PV*SOL [77].

PVSyst (obr. č. 7.4) je švýcarský simulační software pro návrh, dimenzování a následnou analýzu dat fotovoltaických systémů. Je zaměřen na všechny typy systémů a nabízí rozsáhlou databázi komponentů, která obsahuje nejen nejnovější typy modulů a střídačů, ale i takové komponenty, které již nejsou na trhu dostupné. Velice obsáhlá je taktéž meteorologická databáze, která umožňuje poskytnutí podrobných dat o klimatických podmínkách v dané lokalitě, což zajistí vyšší přesnost simulace.

PVSyst je schopen zpracovat podrobnou analýzu výsledků simulace a následně je zobrazit v tabulkách a grafech, přičemž jedním z nejdůležitějších výstupů simulace je diagram ztrát, který lze využít k identifikování slabín v návrhu systému. Software také poskytuje prostředí podobné 3D CAD, ve kterém lze vytvořit složitější model FV systému a jeho blízkého okolí. Výhoda PVSystu je taktéž v jeho jednoduchosti a přehlednosti. Mezi nevýhody pak patří jednoznačně neschopnost softwaru zpracovat podrobnou analýzu zastínění.

PV*SOL je německý simulační software vyvinutý společností Valentine Software, jenž umožňuje detailní návrh FV systému pomocí 3D vizualizace (obr. č. 7.5), která nabízí velké množství funkcí. Mezi největší výhody patří především namodelování existujícího objektu (např. budovy) a konkrétních prvků, které vrhají na objekt stín (např. okolní budovy, stromy či komíny a jiné objekty umístěné na střeše budovy). Tato funkce je pak využita při podrobné analýze zastínění FV modulů. Ve 3D vizualizaci lze taktéž manuálně umisťovat jednotlivé moduly či řady modulů na požadované místo nebo zadávat různé konfigurace propojení komponentů a hledat tak optimální nastavení. PV*SOL

vyniká schopností modelovat více polí a více střídačů ve stejné simulaci, což u většiny jiných nástrojů není možné. Každé pole lze definovat nezávisle na ostatních, včetně typu modulu, náklonu a azimutu pole, což vede u složitých projektů s více budovami k výraznému zkrácení doby simulace.

Sub-array

Sub-array name and Orientation
 Name: PV Array
 Orient.: Fixed Tilted Plane
 Tilt: 45°
 Azimuth: -9°

Pre-sizing Help
 No sizing
 Enter planned power: 21.0 kWp
 ... or available area(modules): 176 m²

Select the PV module
 All modules | Filter: All PV modules
 Isofoton | 110 Wp 29V Si-mono I 110/24 | Until 2005 | Manufacturer | Open
 Use optimizer
 Sizing voltages : Vmpp (60°C) 29.6 V
 Voc (-10°C) 48.1 V

Select the inverter
 All inverters | Output voltage 230 V Mono 50Hz | 50 Hz | 60 Hz
 Sun Power | 2.5 kW 194 - 400 V LF Tr 50 Hz SP 2500-450 | Until 1980 | Open
 Nb. of inverters: 8 | Operating voltage: 194-400 V | Global Inverter's power: 20.0 kWac
 Input maximum voltage: 450 V

Design the array
Number of modules and strings
 Mod. in series: 8 | between 7 and 9
 Nb. strings: 24
 Overload loss: 0.0 % | Pnom ratio: 1.06 | Show sizing
Nb. modules: 192 Area: 164 m²

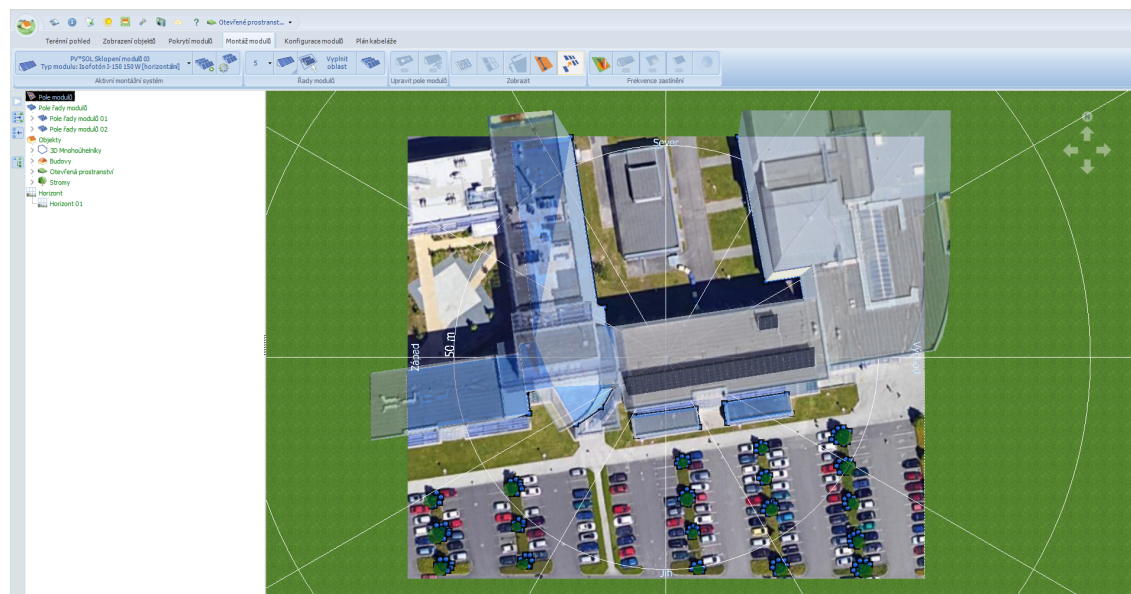
Operating conditions
 Vmpp (60°C): 237 V
 Vmpp (20°C): 284 V
 Voc (-10°C): 385 V

Plane irradiance: 1000 W/m²
 Imp (STC): 76.4 A
 Isc (STC): 81.1 A
 Isc (at STC): 81.1 A

Max. in data
 STC
 Max. operating power (at 1000 W/m² and 50°C): 19.0 kW
Array nom. Power (STC): 21.1 kWp

Obr. 7.4: Zadání parametrů komponentů FV systému v programu PVSystem

Výhodou PV*SOLU je jeho přátelské prostředí, které provede uživatele postupně jednotlivými kroky při navrhování FV systému – od základních dat o lokaci, přes již zmíněnou 3D vizualizaci, kde má uživatel k dispozici obsáhlou databázi komponentů, jejich následnou konfiguraci, přičemž software sám navrhne neoptimálnější možnost podle toho jak efektivně je využita kapacita měniče. Dalším krokem je pak definování kabelových rozvodů systému, což je velice důležité z hlediska výpočtu výsledných ztrát. Po provedení simulace software zobrazí podrobnou analýzu dat včetně ekonomického zhodnocení, energetické bilance či prognózy výnosů. Velké množství funkcí a rozsáhlé databáze mohou představovat i jistou nevýhodu PV*SOLU, jelikož prvotnímu uživateli tohoto softwaru může nějaký čas trvat, než pochopí všechny možnosti, které program nabízí.



Obr. 7.5: Ukázka prostředí 3D vizualizace v programu PV*SOL

7.5.1 Simulace FVE

Samotná simulace projektu jak v programu PV*SOL tak v PVSyst je ovlivněna velkým množstvím vstupních proměnných, které lze libovolně využít podle toho, kolik informací o daném FV systému či jeho lokalitě má uživatel k dispozici nebo dle potřeby více či méně podrobné simulace.

7.5.1.1 Zadávání parametrů

Jako názornou ukázkou jsem provedla simulaci fotovoltaické elektrárny, která je umístěna na střeše Fakulty elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni. Jedná se o FV systém o 192 modulech typu Isofotón IS-110, které disponují výkonem 21,12 kWp na ploše 164 m² a jsou instalovány na nosné konstrukci se sklonem 45°. Dále je v systému umístěno 8 střídačů od společnosti Sun Power s typovým označením SP 2500 – 450, pracujících v rozsahu od 194 do 400 V. Po zadání podrobných dat o lokalitě, díky kterým lze určit meteorologické podmínky, jsem pomocí funkce 3D vizualizace namodelovala budovu elektrotechnické fakulty a taktéž objekty v její bezprostřední blízkosti, což jsou ostatní budovy fakulty a stromy na přilehlém parkovišti. Ani jeden z těchto objektů však nevrhá na FV systém žádný stín, jediné zastínění, která na modulech vzniká, je od nosné konstrukce na druhé řadě panelů. Jak lze vidět na obr. č. 7.6, nejvíce ovlivňují vzniklé stíny spodní řadu panelů (cca 12 %) a horní řadu téměř nikoliv.



Obr. 7.6: Simulace zastínění modulů v programu PV*SOL

Software PV*SOL umožňuje podrobný výpočet ztrát způsobených kabelovými rozvody, které lze definovat na samostatné kartě v programu volbou délky a průřezů jednotlivých kabelů. Lze vycházet z hodnot, které poskytne 3D vizualizace, ve které je možné libovolně nastavovat průřezy kabelů a hledat tak nejoptimálnější kombinace. Výsledná volba parametrů kabelů je silně ovlivněna daným rozpočtem pro FV systém, jelikož s rostoucím průřezem použitých kabelů sice klesá hodnota celkových ztrát, avšak roste jejich pořizovací cena.

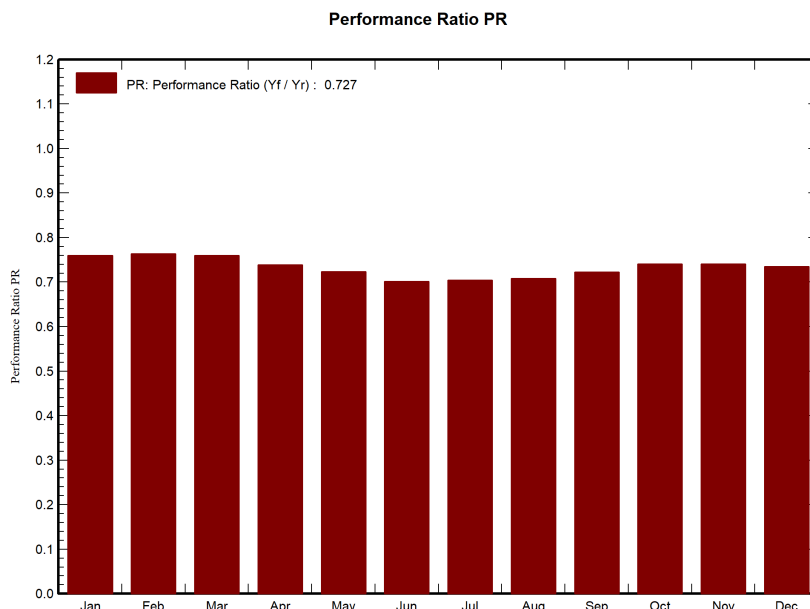
Mezi další funkce programu, které ovlivňují výsledky simulace, patří např. degradace modulu – vyjádřena buď lineární nebo exponenciální závislostí. U lineární závislosti lze manuálně nastavit účinnost modulu v jednotlivých letech. Další funkcí programu je možnost nastavit časový krok simulace (1 hodina pro rychlejší, 1 minuta pro přesnější simulaci) nebo model difúzního záření.

7.5.1.2 Porovnání výsledků simulací

Jak již bylo zmíněno, oba softwarové programy PVSyst a PV*SOL zpracují podrobnou zprávu s daty ze simulace doplněnou o názorné grafy a tabulky, pomocí kterých lze vyhodnotit efektivnost fotovoltaického systému jak z hlediska energetického, tak i ekonomického.

Mezi klíčové parametry, na které je důležité se při návrhu FV systému zaměřit, je koeficient výkonnosti (zkráceně PR z anglického *Performance Ratio*), který vyjadřuje poměr mezi reálným energetickým výnosem systému a výnosem ideálním. Obecně se hodnota PR u střešních systémů pohybuje mezi 70 a 85 %. Simulace FVE na elektro-

technické fakultě ZČU v programu PV*SOL určila hodnotu PR jako 76,4 % a program PVSyst jako 72,7 % - obě hodnoty tak odpovídají teoretickému předpokladu. Na obr. č. 7.7 je zobrazen měnící se PR v rozmezí jednoho roku - lze vidět, že je celoročně konstantní s mírným poklesem v letních měsících.



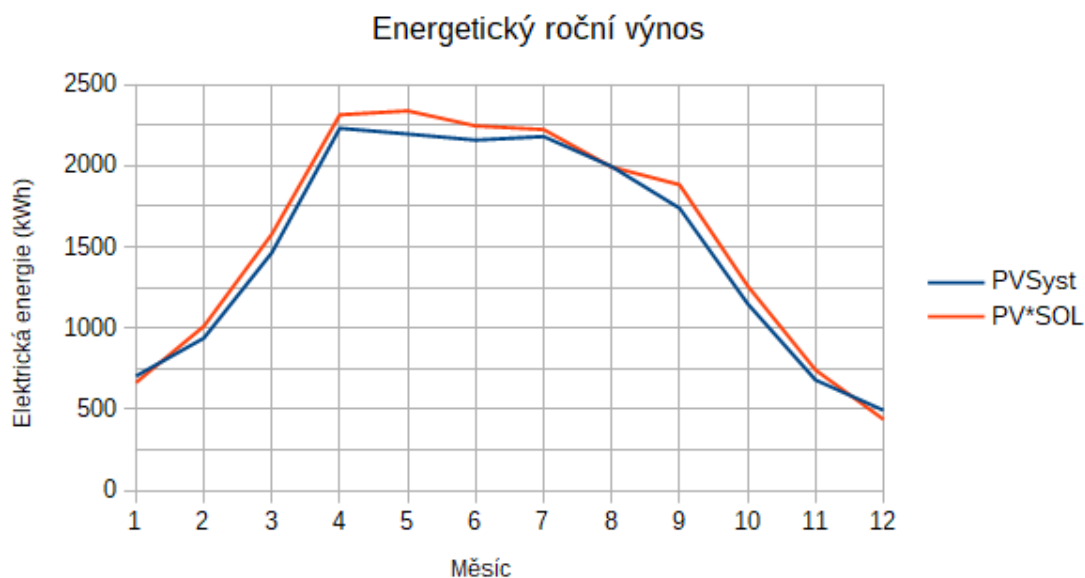
Obr. 7.7: Koefficient výkonnosti během jednoho roku (PVSyst)

Parametry, ze kterých lze určit celkovou efektivnost systému, jsou vyrobená energie dodaná do sítě a taktéž globální efektivní ozáření panelů. V tab. č. 7.1 jsou uvedeny roční hodnoty vypočtené simulacemi. Celková energie dodaná systémem do rozvodné sítě činí 18 709 kWh/rok (PV*SOL), resp. 17 946 kWh/rok (PVSyst). Celková hodnota globálního efektivního ozáření plochy je 1158 kWh/m² (PV*SOL), resp. 1133 kWh/m² (PVSyst).

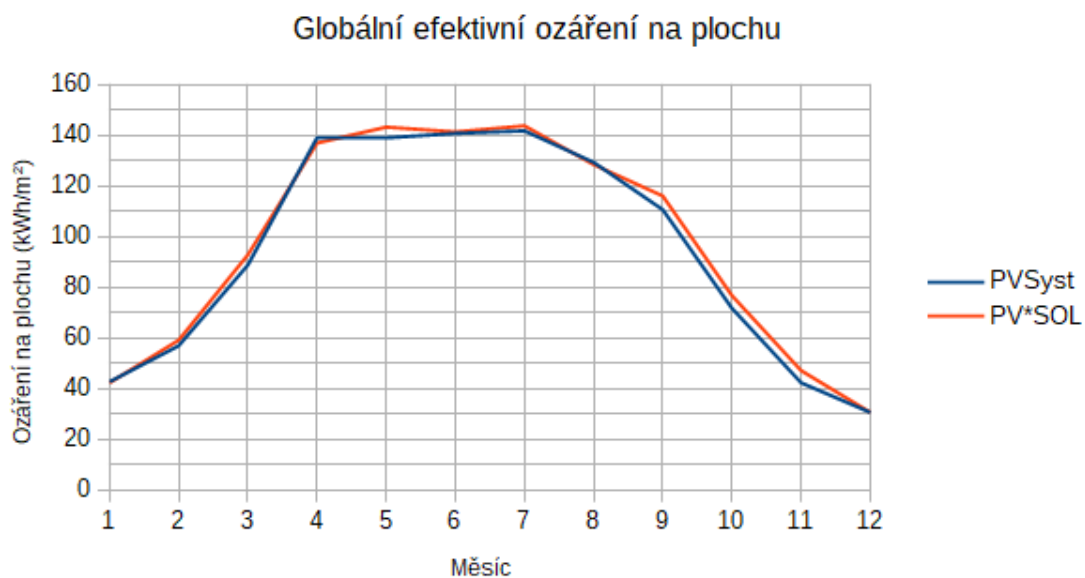
Tab. 7.1: Výsledky simulace

Měsíc	Roční energetický výnos (kWh)		Globální ozáření (kWh/m ²)	
	PVSyst	PV*SOL	PVSyst	PV*SOL
1	706	666	42,7	42,3
2	940	1013	56,9	59,1
3	1466	1580	88,8	92,8
4	2232	2315	138,8	136,9
5	2197	2339	139,1	143,2
6	2159	2246	140,7	141,3
7	2181	2224	141,7	143,7
8	1996	1993	129,8	128,4
9	1740	1884	110,6	115,9
10	1152	1262	71,1	76,7
11	682	743	42,3	47,1
12	495	439	30,6	30,6

Na grafu č. 7.8 resp. č. 7.9 je zobrazen roční energetický výnos systému, resp. roční globální ozáření na plochu. Z grafů lze vidět, že výsledné hodnoty kopírují stejný trend, pouze s nepatrnými odchylkami.



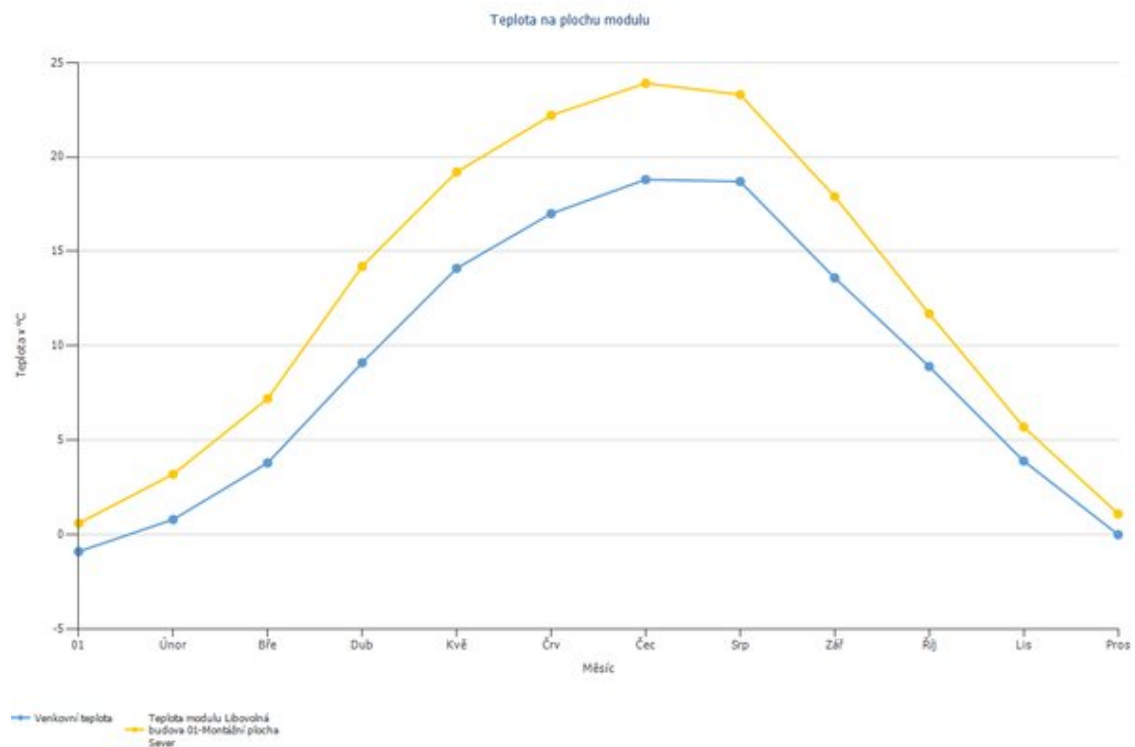
Obr. 7.8: Energetický roční výnos



Obr. 7.9: Globální efektivní ozáření na plochu

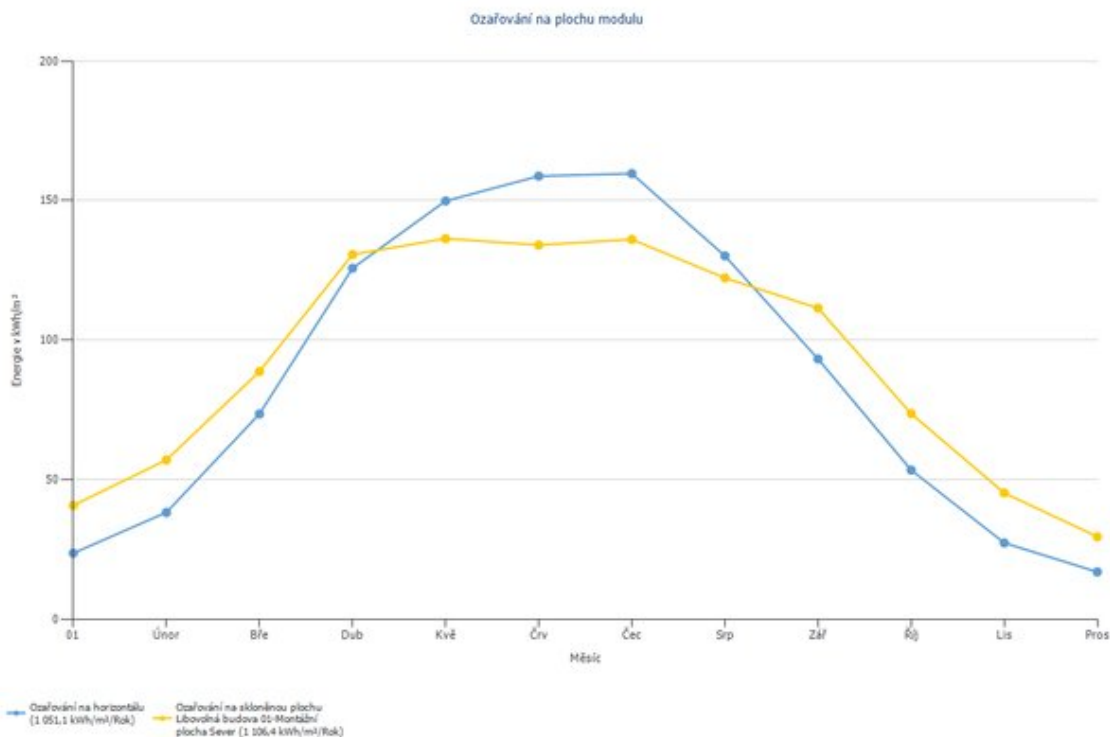
Na obrázku č. 10.1 v příloze A je vyobrazeno porovnání hodnot ozařování na skleněnou plochu modulů a jejich teploty v létě, resp. na obrázku č. 10.2 v zimě. Na grafu, jenž popisuje letní období můžeme vidět závislost obou veličin, které kopírují stejný

trend - tzn. při větším množství dopadajícího slunečního záření na plochu modulů se zvyšuje jejich teplota a s menším ozařováním ploch teplota klesá. Z grafu můžeme vyčíst maximální teplotu modulu, která dosáhla $56,86\text{ }^{\circ}\text{C}$, přičemž průměrná hodnota v zobrazeném období se pohybuje kolem $23\text{ }^{\circ}\text{C}$. Jmenovitá provozní teplota jednoho článku panelu Isofotón IS-110 při $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a hodnotě ozáření 800 W/m^2 je dle datasheetu $47\text{ }^{\circ}\text{C}$. Graf reprezentující chování teplot v zimě (obr. č. 10.2) ukazuje vliv denního slunečního záření na teplotu modulu. Nejnižší zaznamenaná teplota modulu v tomto období činí $-9,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ a nejvyšší přibližně $22\text{ }^{\circ}\text{C}$. Na obrázku č. 7.10 je pak zobrazeno porovnání venkovní teploty a teploty modulu v rozmezí jednoho roku. Je zde vidět očekávaný trend, kdy křivka teploty modulů kopíruje křivku vyjadřující venkovní teplotu.



Obr. 7.10: Porovnání venkovní teploty a teploty modulu

Na obrázku č. 7.11 lze vidět porovnání ozáření na skloněnou plochu modulu a na horizontále. Z grafu můžeme vyčíst, že během teplých měsíců (květen - srpen) jsou hodnoty ozáření na horizontále vyšší než na skloněné ploše, kdežto v ostatních měsících je energie ze slunečního záření vyšší na skloněné ploše modulů.



Obr. 7.11: Porovnání ozařování na skloněnou plochu s ozařováním na horizontále

Obrázek č. 10.3 v příloze A zobrazuje podrobný diagram ztrát, kde můžeme vidět celkovou hodnotu vyrobené elektrické energie, která činí 23 929 kWh ročně. Po odečtení ztrát na modulech způsobených zastíněním, degradací, úrovní slunečního ozáření, vlivem okolní teploty, kvalitou a nesouladem modulů a ohmickou elektroinstalací je výsledná hodnota energie 19 787 kWh. Po odečtech ztrát způsobených střídači je výsledná celková hodnota vyrobené elektrické energie 17 946 kWh ročně.

Závěrem lze tedy říci, že oba softwary provádějí simulace na podobném principu a vycházejí z obdobných parametrů. V případě složitější struktury systému lze očekávat větší spolehlivost u programu PV*SOL z důvodu jeho podrobné analýzy zastínění, kterou PVSyst nedisponuje, a taktéž intuitivního prostředí 3D vizualizace. Naopak při jednoduchém uspořádání, jako je např. uvedená FVE na střeše elektrotechnické fakulty ZČU, bych volila PVSyst z důvodu větší přehlednosti a většího množství výsledných grafů pro analýzu systému.

8 Kontrola modelové FVE

Provádění kontrol fotovoltaických elektráren lze provádět buď vizuálně nebo pomocí diagnostických přístrojů, popř. v ideálním případě kombinací obou metod. Z důvodu covidové pandemie jsem bohužel neměla možnost provést vlastní analýzu aktuálního stavu elektráren, a tak jsem použila dokumentaci z předešlých let, která je však pro účely kontroly a upozornění na problematická místa dostačující.

8.1 Znečištění FV panelů

Ke znečištění panelů dochází vlivem okolního prostředí, kdy se na povrchu panelů usazují různé nečistoty z ovzduší, jako např. prachové či pylové částice, pokud je fotovoltaická elektrárna umístěna v blízkosti polí a parků, nebo saze z okolních továren a stavenišť. Velmi častým důvodem znečištění je taktéž hmyz či ptačí trus, popř. v zimním období lze za nečistoty brát i sníh. Znečištěný panel je uveden na obr. č. 8.1.



Obr. 8.1: Znečištěný panel

Pravidelné čištění panelů je důležité jak z hlediska zajištění co největší možné výkonnosti modulů, a tím i celé elektrárny, tak z hlediska životnosti samotných fotovoltaických článků. Znečištění a nedostatečná údržba panelů může vést k jejich rychlejší degradaci a v krajních případech i ke vzniku poruch, které mohou být jednou z možných příčin požáru.

8.2 Vlhkost a působení organismů

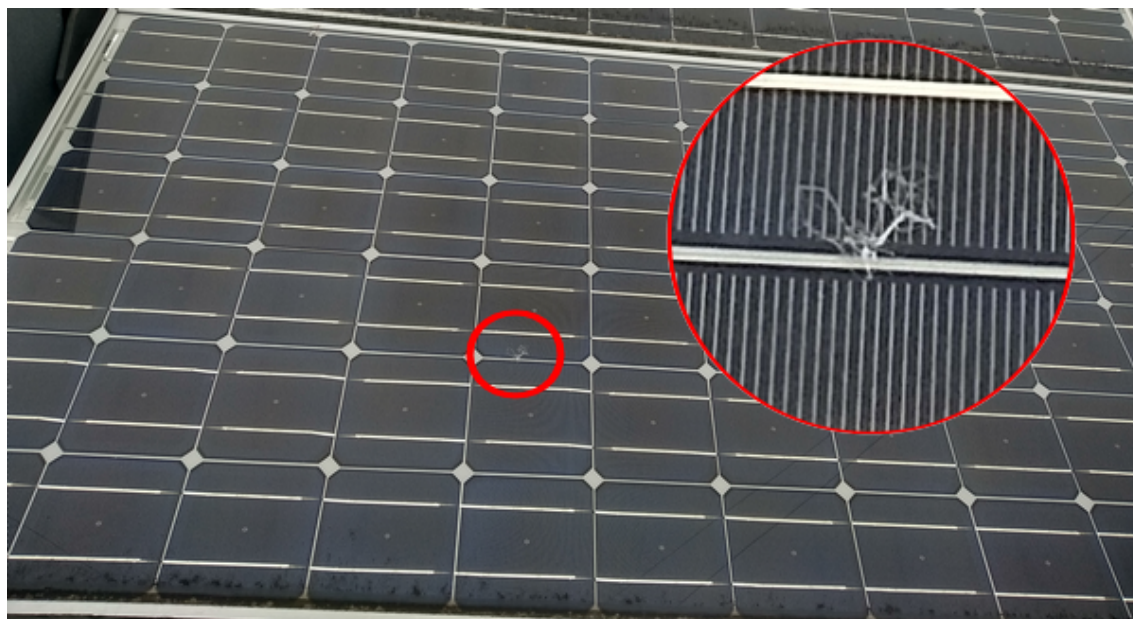
Živé organismy jsou dalším častým důvodem vzniku vad nejen u fotovoltaických panelů, ale u všech částí elektrárny, jelikož jsou všude přítomny prvky citlivé na biologickou korozi kovů a plastů. Pokud se fotovoltaický systém nachází ve vlhkém prostředí, vznikají ideální podmínky pro negativní působení organismů (plísni a mechů), avšak i dobře větrané, suché prostředí může být těmito škůdci napadeno. Největším a nejčastějším problémem v těchto oblastech je usazování nečistot na spodní části fotovoltaického panelu, které mohou zasahovat do aktivní části modulu, zapříčinit pokles jeho výkonu a nenávratně ho poškodit. Následkem tvorby mechu a plísní mohou být tzv. hot-spoty nebo také porucha těsnění mezi sklem a hliníkovým rámem panelu.



Obr. 8.2: Usazování živých organismů v důsledku vlhkosti na rámech panelů

8.3 Prasklina na panelu

Praskliny můžeme rozdělit na lokální a celoplošné. Lokální prasklina (jak je znázorněno na obr. č. 8.3) postihuje jen malý počet článků a způsobuje tzv. lokální zastínění. Snižuje intenzitu dopadajícího slunečního záření v postiženém místě, což vede k poklesu generovaného proudu danými články, a tím pádem k poklesu výkonu celého modulu. Problémem je taktéž fakt, že se postižené články zahřívají a hrozí tak tvorba hot-spotů.



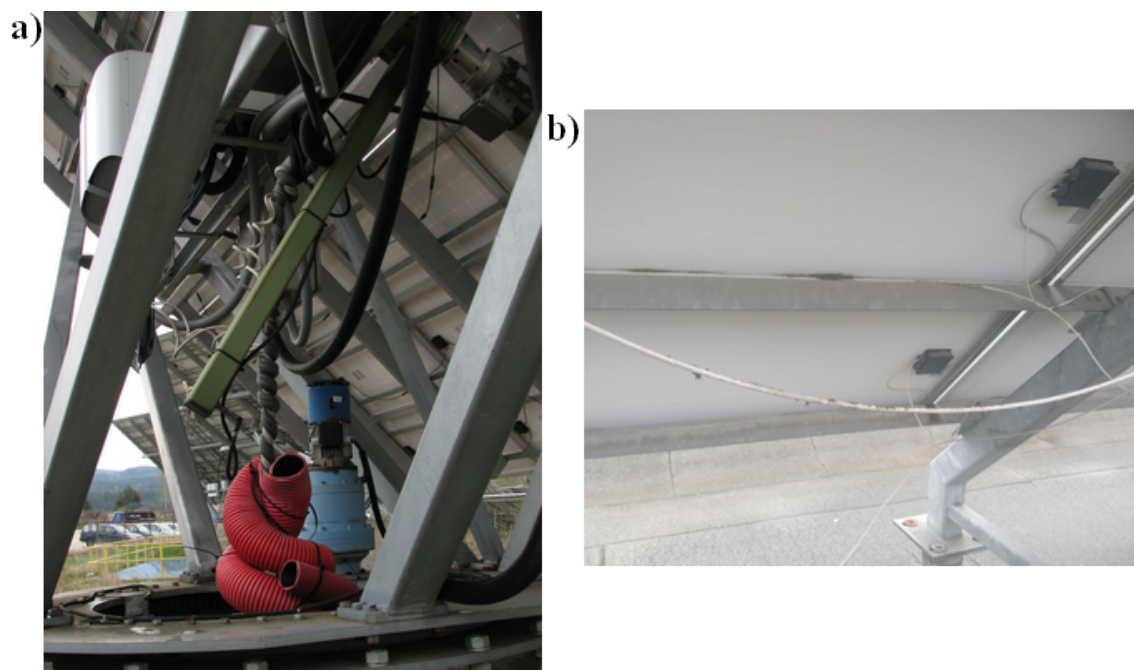
Obr. 8.3: Prasklina na panelu

Praskliny na panelech vznikají většinou v důsledku mechanického namáhání – např. tíhou usazeného sněhu nebo změnou teplot, v krajním případě po zásahu cizím předmětem. Okem neviditelné zárodky prasklin mohou vzniknout nevhodnou manipulací už při výrobě samotných panelů, a proto je vhodné důkladně zkontrolovat panely již před instalací. K takové kontrole je však zapotřebí použít nějakou z diagnostických metod.

8.4 Poruchy kabeláže

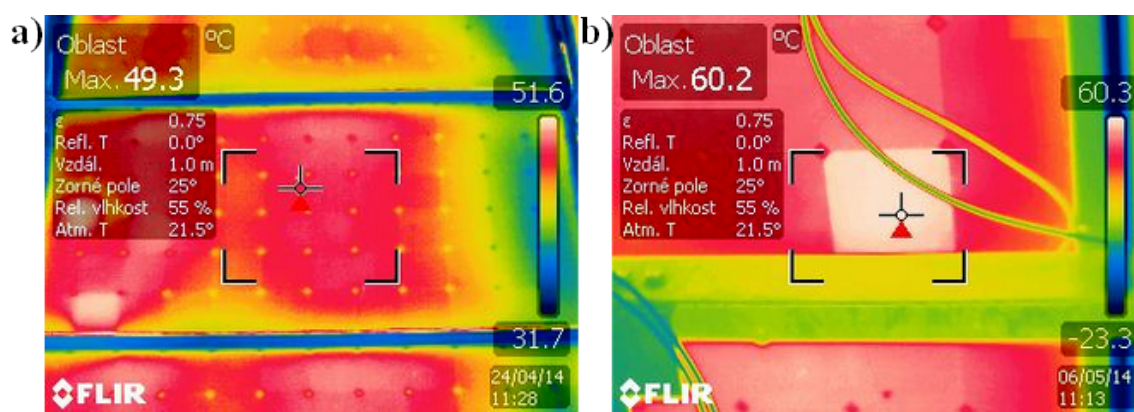
Typů poruch kabeláže je velké množství, mezi nejčastější patří především nevhodné dimenzování průřezů vzhledem k jejich délce, což může mít za následek přehřívání kabelů a taktéž ztrátu výkonu. Při nadměrném zahřívání kabelů může dojít k poruše izolace s následným požárem. Dalším typem poruch je špatné či nedostatečné uchycení nebo uložení kabelů na konstrukci panelů. Volně visící nebo ležící kabely jsou obzvláště nebezpečné při provádění jakéhokoliv mechanického zásahu v blízkosti panelů, jelikož může dojít k jejich přehlédnutí a člověk o ně může zakopnout či se o ně nechtěně zachytit. Další riziko představují nesprávně uložené kabely v podobě možného rozpojení konektorů či kompletního vytržení z místa připojení. Při nedokonalém spojení konektorů může dojít k jejich přehřátí, což opět může vést až k vzniku požáru. Poslední častou poruchou, ke které dochází, když není kabeláž správně chráněna a uložena, je překousání zvířaty nebo vznik defektů způsobených okolním prostředím (vlhkostí, povětrnostními vlivy, atd.). Příklad špatného zacházení s kabeláží je uveden na obr. č.

8.4 a), kde jsou vidět zkroucené kabely, resp. na obr. č. 8.4 b), kde je zobrazen volně visící, degradující kabel.



Obr. 8.4: a) Zkroucené kabely a b) volně visící, degradující kabel

Na obr. č. 8.5 jsou vyobrazeny snímky z termokamery, které zobrazují přední (a) a zadní (b) stranu panelu. Na snímkách je jasně vidět vadný článek, který má výrazně vyšší teplotu než zbytek panelu. V tomto případě jsou nejpravděpodobnější příčinou poruchy vadné spoje.



Obr. 8.5: Termo snímek a) přední a b) zadní strany panelu s vadným článkem

8.5 Nosná konstrukce

Správné uchycení nosné konstrukce na střeše budovy (popř. na zemi) je klíčový prvek pro správný chod celé elektrárny a především její bezpečnost. Pro každý typ fotovoltaického panelu existuje montážní postup, který jasně definuje jak správně panely uchytit, jaké úchyty použít a jaké jsou minimální rozestupy mezi úchyty. Při pravidelně prováděné kontrole je důležité posoudit stav použitých úchytů a pomůcek pro uchycení a rozhodnout, zdali není potřeba některé vyměnit.

Na obr. č. 8.6 je vidět vadná montáž nosných prvků panelů, což má za následek zkroucenou konstrukci. Panely jsou viditelně propadlé či naopak vystouplé a ve výsledku je každý orientován jinam, což snižuje výkonnost nejen vadných panelů, ale i celého systému.



Obr. 8.6: Vadné zkroucené konstrukce

Další příklad špatně provedené instalace konstrukce je uveden na obr. č. 8.7 z fotovoltaické elektrárny v Bušanovicích, kde jsou moduly umístěné na dřevěné konstrukci. Lze zde vidět detail spoje dvou panelů, který je nešťastně umístěn přímo nad nosným dřevěným trámem. Dešťové kapky či tající sníh jednoduše proniknou štěrbinou mezi panely a poté dopadají na trám, který začne hnít. Životnost konstrukce se tak znatelně sníží a je nutné zasažené trámy vyměnit.



Obr. 8.7: Špatně umístěný spoj panelů

Na obr. č. 8.8 je zobrazena jiná část konstrukce s panely umístěnými v takové poloze, aby pronikající voda štěrbinou mezi panely nedopadala přímo na nosný trám. Lze však vidět stále se usazující plíseň na tráměch, na nichž jsou přímo upevněny panely, což značí, že ani toto řešení není optimální.



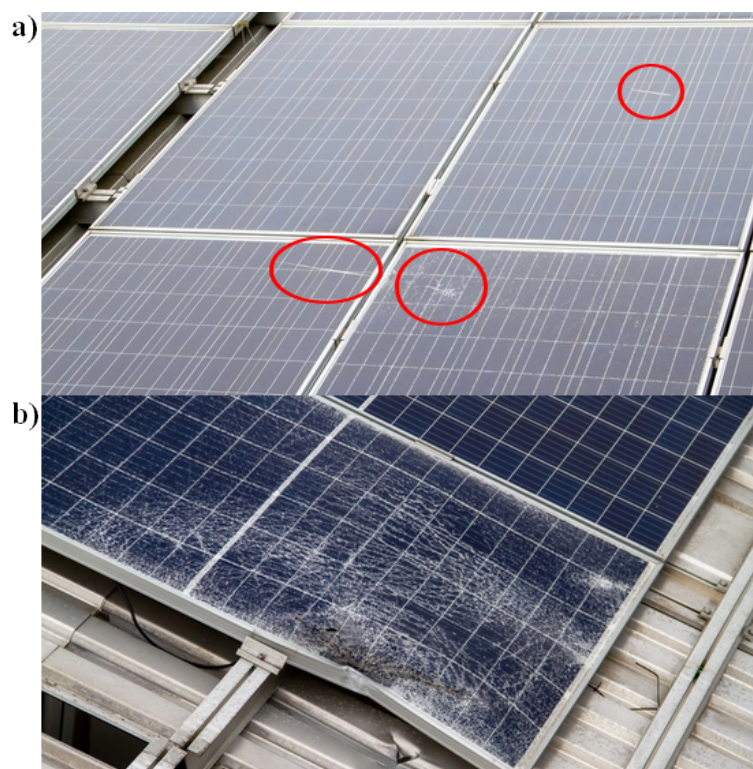
Obr. 8.8: Lepší řešení umístění spoje panelů

Poslední ukázka vadné konstrukce je zobrazena na obr. č. 8.9. V tomto případě došlo k chybě při montáži, kdy nebyly dostatečně utažené šrouby držící příchytky panelů a při silném větru došlo k odtržení několika modulů. Při nehodě se nejen panely rozbily, ale zároveň i poškodily ostatní.



Obr. 8.9: Vadná konstrukce, která zapříčinila odtržení panelů

Na obr. č. 8.10 a) jsou vidět poškození způsobená letícími panely – praskliny či rýhy na článcích a na obr. č. 8.10 b) je vidět rozbitý panel.



Obr. 8.10: a) Praskliny a rýhy od letících panelů a b) rozbitý panel

9 Závěr

Předkládaná diplomová práce se věnuje možným příčinám požárů fotovoltaických elektráren. V první části se věnuji úvodu do tematiky, kde popisuji základní funkce fotovoltaického článku a jeho sledované parametry pro určování efektivnosti a taktéž jsou zde uvedeny typy fotovoltaických systémů včetně jejich nejdůležitějších komponent. Kapitola 5 je věnována podrobné rešerši možných příčin požárů FVE, kde jsou především zkoumány poruchy způsobené působením elektrického proudu, ale jsou zde zmíněny i chyby neelektrického původu. V další části jsem představila nejpodstatnější legislativní a normativní dokumenty, jež se věnují požární bezpečnosti fotovoltaických elektráren. Sedmá kapitola je zaměřena na pokyny pro navrhování, revize, diagnostiku a údržbu FVE a je doplněna praktickou ukázkou návrhu jednoduché fotovoltaické elektrárny a taktéž její podrobnou analýzou v softwarech PVSyst a PV*SOL. V poslední části je provedena kontrola FV elektráren prostřednictvím fotodokumentace.

Fotovoltaický průmysl je rychle rostoucí a hojně využívané odvětví výroby elektrické energie, avšak FVE stále vzbuzují určité obavy z hlediska požární bezpečnosti. Z provedené rešerše a zjištěných poznatků však můžu říci, že fotovoltaické elektrárny jsou při správně provedené instalaci a pravidelných a důkladných kontrolách velice bezpečné z hlediska rizika vzniku požáru. Je však nutné upozornit na malé množství právních předpisů v ČR týkajících se obecně fotovoltaických systémů. Vzhledem k velkému a stále se zvyšujícímu počtu instalací FVE by se dle mého názoru měla legislativa tomuto odvětví více věnovat, aby byla zajištěna co největší informovanost o správném provozování fotovoltaických systémů.

Jako velmi přínosnou pomůcku před samotnou stavbou fotovoltaické elektrárny shledávám možnost simulace v softwaru určeném pro tyto účely, jako je např. PVSyst nebo PV*SOL. Pomocí podrobných analýz je možné určit nejvýhodnější umístění a typy komponent, jejich konfiguraci a účinnost. Zároveň je možné se díky výsledné analýze vyhnout zbytečným chybám při projektování FVE. Simulace může rovněž upozornit na případné nedostatky v systému.

Při kontrole stavu fotovoltaických elektráren z poskytnuté fotodokumentace je patrné, že prováděné kontroly nejsou dostatečné, nebo na nalezené vady není brán zřetel. Všechny nedostatky popsané v kapitole 8 představují potenciální riziko, které může vést k poškození určité části elektrárny a následnému nesprávnému chodu systému,

či v krajním případě i k poruchám takového rozsahu, které zapříčiní požár. K mnoha chybám dochází uvnitř elektrických zařízení a lidskému oku mohou zůstat skryty, a proto na odhalení většiny závažných poruch fotovoltaických systémů nestačí provést pouze vizuální kontrolu. Je nutné kontroly doplnit nějakou z diagnostických metod - např. analýzou pomocí termokamery, která dokáže odhalit místa s výrazně odlišnou teplotou, jež mohou znázorňovat závadu.

Přesné pokyny, jak postupovat při požáru FVE, jsou velmi dobře zpracovány v metodických listech Bojového řádu jednotek požární ochrany. Nejdůležitějším poznatkem je fakt, že pokud jsou fotovoltaické panely ozařované slunečními paprsky, nelze stejnosměrnou část systému odpojit, a proto je nutné dbát při zásahu do systému zvýšené opatrnosti. Pozitivem je ale fakt, že fotovoltaické panely jsou vyráběny z nepříliš hořlavých materiálů, a tak není nutné je při požáru hasit, pokud to situace nevyžaduje. V mnoha případech však požár vzniká v takových částech elektrárny, odkud se rychle a nekontrolovaně šíří dál. Nejnebezpečnější jsou požáry střešních krytin rodinných domů nebo požáry rozvaděčů elektrické energie, popř. střídačů umístěných uvnitř objektu. Takovéto situace jsou životu nebezpečné, a proto je podstatné je řešit a co nejrychleji odstranit jakékoliv nalezené poruchy a nedostatky na fotovoltaických elektrárnách.

V blízké budoucnosti lze očekávat, že lidstvo bude závislé pouze na obnovitelných zdrojích energie. Ačkoliv technologie využívané ve FVE jsou stále relativně nové způsoby, jak získat elektrickou energii, přesto již u nich umíme identifikovat poruchy a nedostatky a eliminovat je. Tyto poruchy nejen že omezují výrobu elektrické energie, ohrožují bezpečnost elektráren, ale současně i představují riziko pro životní prostředí. Proto je důležité se zaměřit na zdokonalení stávajících technologií takovým způsobem, aby byla dosažena co nejvyšší účinnost a spolehlivost přeměny energie a plně využit potenciál fotovoltaiky.

Literatura

- [1] *Fotovoltaické systémy pro výrobu elektřiny* [online]. Czech Nature Energy, . [cit. 2020/11/14]. Dostupné z: <http://www.cne.cz/fotovoltaicke-systemy/uvod-do-fv-systemu/>.
- [2] *Exploring solar panel efficiency breakthroughs in 2020* [online]. Youtube, 2020. [cit. 2020/11/17]. Dostupné z: <https://youtu.be/2uI0eHC0r-0>.
- [3] TAGLIAMONTE, E. *Optimizing I-V Curve Tracing Activities* [online]. PV Pros, Inc., 2021. [cit. 2021/02/22]. Dostupné z: <https://pvpros.com/optimizing-v-curve-tracing-activities/>.
- [4] *Solar Cell I-V Characteristic* [online]. Alternative Energy Tutorials. [cit. 2021/02/22]. Dostupné z: <https://www.alternative-energy-tutorials.com/energy-articles/solar-cell-i-v-characteristic.html>.
- [5] POULEK, V. – LIBRA, M. *Konstrukce a výroba fotovoltaických článků a panelů* [online]. ELEKTRO - časopis pro elektrotechniku, 2010. [cit. 2021/03/03]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/40646.pdf>.
- [6] BECHNÍK, B. *Optimální orientace a sklon fotovoltaických panelů* [online]. tzbinfo, 2014. [cit. 2021/03/13]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/114865-optimalni-orientace-a-sklon-fotovoltaickyh-panelu>.
- [7] MAJLING, E. *Studie: Cenově nejvýhodnější jsou oboustranné solární panely s technologií sledování pohybu Slunce* [online]. OEnergetice, 2020. [cit. 2021/03/13]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/obnovitelne-zdroje/>.
- [8] *Fotovoltaická elektrárna* [online]. ISOFEN ENERGY s.r.o. [cit. 2021/03/13]. Dostupné z: <http://www.isofenenergy.cz/fotovoltaicka-elektrarna.aspx>.
- [9] CZECH RE AGENCY, o. *Fotovoltaický střídač - účinnost není vše* [online]. tzbinfo, 2009. [cit. 2021/03/13]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/5571-fotovoltaicky-stridac-ucinnost-neni-vse>.
- [10] KLIMEK, P. – BECHNÍK, B. *Střídač pro fotovoltaickou elektrárnu. Jakou technologii zvolíte?* [online]. tzbinfo, 2013. [cit. 2021/03/13]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/9555-stridac-pro-fotovoltaickou-elektrarnu-jakou-technologiei-zvolite>.

- [11] *Distribution board* [online]. Wikipedia: the free encyclopedia, 2021. [cit. 2021/03/13]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Distribution_board.
- [12] NOS, F. *Požáry fotovoltaických elektráren* [online]. Časopis 112, 2018. [cit. 2021/03/03]. Dostupné z: <https://www.hzscr.cz/clanek/casopis-112-rocnik-xvii-cislo-1-2018.aspx?q=Y2hudW09NA%3D%3D>.
- [13] MANIMEKALAI, P. *An Overview of Batteries for Photovoltaic (PV) Systems* [online]. International Journal of Computer Applications, 2013. [cit. 2021/03/10]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/278670768_An_Overview_of_Batteries_for_Photovoltaic_PV_Systems.
- [14] HRZINA, P. *Napětí akumulátorů – od článků k napěťovým systémům bateriových úložišť* [online]. tzbinfo, 2020. [cit. 2021/03/10]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektriny/>.
- [15] *Co je D.O.D, aneb jak hodně baterii vybit?* [online]. VSelektro, 2020. [cit. 2021/03/10]. Dostupné z: <https://www.vselektro.eu/depth-of-discharge/>.
- [16] HRZINA, P. *Cykly a životnost baterie* [online]. tzbinfo, 2020. [cit. 2021/03/10]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektriny/>.
- [17] REICHL, T. *Samovybíjení baterií - jak správně skladovat baterie* [online]. OEnergetice, 2015. [cit. 2021/03/10]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrina/samovybijeni-baterii-jak-spravne-skladovat-baterie>.
- [18] *FOTOVOLTAIKA* [online]. SVP Solar, . [cit. 2020/12/01]. Dostupné z: <https://www.svp-solar.cz/fotovoltaika/>.
- [19] *Jak funguje olověný akumulátor?* [online]. tzbinfo, 2017. [cit. 2021/03/13]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektriny/>.
- [20] MATAJS, V. *Jak funguje ostrovní fotovoltaický systém?* [online]. Solární Experti s.r.o., 2015. [cit. 2021/03/13]. Dostupné z: <https://www.solarniexperti.cz/jak-funguje-ostrovnii-off-grid-fotovoltaicky-system/>.
- [21] ZIPP, K. *What are some common types of solar PV and storage installations?* [online]. Solar Power World, 2015. [cit. 2021/03/13]. Dostupné z: <https://www.solarpowerworldonline.com/2015/10/what-are-some-common-types-of-solar-pv-and-storage-installations/>.
- [22] *Hybridní fotovoltaický systém* [online]. Solareni. [cit. 2021/03/15]. Dostupné z: <https://www.solareni.cz/a-7-hybridni-fotovoltaicky-system.html>.

- [23] *Co je to hybridní solární elektrárna?* [online]. E.ON. [cit. 2021/03/15]. Dostupné z: <https://www.eon.cz/radce/co-je-to-hybridni-solarni-elektrarna>.
- [24] *Hybridní fotovoltaické elektrárny* [online]. Obnovitelné zdroje Pardubice. [cit. 2021/03/15]. Dostupné z: <https://www.solarni-vetrne-elektrarny.cz/hybridni-fotovoltaicke-elektrarny>.
- [25] POŠÍK. *Nebezpečí při zásahu na objekt s fotovoltaickou elektrárnou* [online]. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2010. [cit. 2020/12/01]. Bakalářská práce.
- [26] *PV Arc-Fault Circuit Interrupter* [online]. SMA Solar Technology. [cit. 2021/02/08]. SMA America, LLC. Dostupné z: <https://www.sma-america.com/partners/knowledgebase/pv-arc-fault-circuit-interrupter.html>.
- [27] *What causes a Solar fire* [online]. Brighton Energy Cooperative. [cit. 2021/02/13]. Dostupné z: <https://brightonenergy.org.uk/electric-arcs-solar-fire/>.
- [28] *5 potential fire hazards and mitigation in photovoltaic systems* [online]. Solarity. [cit. 2021/02/13]. Dostupné z: <https://solarity.cz/blog/fire-hazards-and-mitigation-in-photovoltaic-systems/>.
- [29] PILLAI, D. – RAJASEKAR, N. *A comprehensive review on protection challenges and fault diagnosis in PV systems* [online]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018. [cit. 2021/02/18]. Volume 91. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.082>.
- [30] *Fire and Solar PV Systems – Investigations and Evidence* [online]. bre National Solar Centre, 2018. [cit. 2021/02/13]. Dostupné z: https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/786882/Fires_and_solar_PV_systems-Investigations_Evidence_Issue_2.9.pdf.
- [31] LÖNING, A. *Fire safety of PV systems* [online]. SMA Solar Technology, 2019. [cit. 2021/02/08]. SMA America, LLC. Dostupné z: <https://www.sma-sunny.com/en/fire-safety-of-pv-systems/>.
- [32] *Kontrola FV systému na zemní spojení* [online]. SMA Solar Technology. [cit. 2021/02/18]. SMA America, LLC. Dostupné z: <https://manuals.sma.de/STP8-10-3AV-40/cs-CZ/391466379.html>.
- [33] TOMEŠ, M. *Zkušenost soudního znalce z posuzování FVE v roce 2011* [online]. FCC Public - Elektro, 2012. [cit. 2021/02/15]. Dostupné z: <http://uniesoudnichznalcu.cz/public/media/files/e04-2012.pdf>.

- [34] KROUTIL, R. *Komplexní provozní diagnostika FVE-T14 - opatření pro optimalizaci provozu* [online]. Vysoké učení technické v Brně, 2016. [cit. 2021/02/15]. Diplomová práce.
- [35] ABDULMAWJOOD, K. – REFAAT, S. S. – MORSI, W. G. *Detection and Prediction of Faults in Photovoltaic Arrays: A Review* [online]. IEEE, 2018. [cit. 2021/02/15]. 2018 IEEE 12th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8372609>.
- [36] ZHAO, Y. – LYONS, R. *Line-line Fault Analysis and Protection Challenges in Solar Photovoltaic Arrays* [online]. IEEE, 2012. [cit. 2021/02/17]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6221990>.
- [37] ZIMMERMANN, M. *Komplexní diagnostika fotovoltaických systémů* [online]. České vysoké učení technické v Praze, 2015. [cit. 2021/02/23]. Bakalářská práce.
- [38] PEI, T. – HAO, X. *A Fault Detection Method for Photovoltaic Systems Based on Voltage and Current Observation and Evaluation* [online]. Energies, 2019. [cit. 2021/02/23]. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/en12091712>.
- [39] LAUKAMP, H. et al. *PV Fire Hazard - Analysis and Assessment of Fire Incidents* [online]. Fraunhofer ISE, 2013. [cit. 2021/02/24]. 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Paris, France. Dostupné z: https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/conference-paper/28-eupvsec-2013/Laukamp_5BV771.pdf.
- [40] *PV Fires - The main causes* [online]. IMO. [cit. 2021/02/24]. Dostupné z: https://www.imopc.com/pages/PV_fires.
- [41] *Zákon č. 406/2000 Sb., o hospodaření energií* [online]. 2000. [cit. 2021/03/17]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2000-406>.
- [42] *Zákon č. 133/1985 Sb., o požární ochraně* [online]. 1985. [cit. 2021/03/17]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/1985-133>.
- [43] *Vyhláška Ministerstva vnitra o stanovení podmínek požární bezpečnosti a výkonu státního požárního dozoru (vyhláška o požární prevenci)* [online]. 2001. [cit. 2021/03/17]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2001-246>.
- [44] *Vyhláška o technických podmínkách požární ochrany staveb* [online]. 2008. [cit. 2021/03/17]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2008-23>.
- [45] *Metodický list 14/N - Nebezpečí úrazu elektrickým proudem* [online]. 2017. [cit. 2021/03/17]. Ministerstvo vnitra – generální ředitelství Hasičského záchranného

- sboru České republiky. Dostupné z: <https://www.hzscr.cz/soubor/2-n-n-ml-14-nebezpeci-urazu-elektrickym-proudem-novela-pdf.aspx>.
- [46] *Metodický list 25/P – Hašení vodou elektrických zařízení a vedení pod napětím do 400 V* [online]. 2017. [cit. 2021/03/17]. Ministerstvo vnitra – generální ředitelství Hasičského záchranného sboru České republiky. Dostupné z: <https://www.hzscr.cz/soubor/4-p-p-ml25-r-haseni-vodou-el-zarizeni-pod-napetim-do-400-v-novela-pdf.aspx>.
- [47] *Metodický list 47/P - Požáry střešních konstrukcí s fotovoltaickým systémem* [online]. 2017. [cit. 2021/03/17]. Ministerstvo vnitra – generální ředitelství Hasičského záchranného sboru České republiky. Dostupné z: <https://www.hzscr.cz/soubor/4-p-p-ml47-stresni-konstrukce-s-fvs-pdf.aspx>.
- [48] *Metodický list 48/P - Požáry fotovoltaických elektráren* [online]. 2017. [cit. 2021/03/17]. Ministerstvo vnitra – generální ředitelství Hasičského záchranného sboru České republiky. Dostupné z: <https://www.hzscr.cz/soubor/4-p-p-ml48-fv-elekrarny-pdf.aspx>.
- [49] *Metodický list 49/P – Požáry střešních konstrukcí s trubicovým fotovoltaickým systémem* [online]. 2017. [cit. 2021/03/17]. Ministerstvo vnitra – generální ředitelství Hasičského záchranného sboru České republiky. Dostupné z: <https://www.hzscr.cz/soubor/p-49-trubicova-fotovoltaika-pdf.aspx>.
- [50] *ČSN EN 62446-1 Fotovoltaické (PV) systémy - Požadavky na zkoušení, dokumentaci a údržbu - Část 1: Systémy spojené s rozvodnou sítí - Dokumentace, zkoušky při uvádění do provozu a kontrola* [online]. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016. [cit. 2021/03/20].
- [51] *ČSN EN IEC 61730-1 ed. 2 Způsobilost k bezpečné činnosti fotovoltaických (PV) modulů - Část 1: Požadavky na konstrukci* [online]. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018. [cit. 2021/03/20].
- [52] *ČSN EN IEC 61730-2 ed. 2 Způsobilost k bezpečné činnosti fotovoltaických (PV) modulů - Část 2: Požadavky na zkoušení* [online]. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018. [cit. 2021/03/20].
- [53] *ČSN 33 2000-6 ed. 2 Elektrické instalace nízkého napětí - Část 6: Revize* [online]. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017. [cit. 2021/03/20].
- [54] *ČSN 33 2000-7-712 ed. 2 Elektrické instalace nízkého napětí - Část 7-712: Zařízení jednoúčelová a ve zvláštních objektech - Fotovoltaické (PV) systémy* [online]. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016. [cit. 2021/03/20].

- [55] ČSN EN 50583-1 Fotovoltaika v budovách - Část 1: Moduly BIPV [online]. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016. [cit. 2021/03/20].
- [56] ČSN EN 50583-2 Fotovoltaika v budovách - Část 2: Systémy BIPV [online]. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016. [cit. 2021/03/20].
- [57] ČSN EN 62109-1 Bezpečnost výkonových měničů pro použití ve výkonových fotovoltaických systémech - Část 1: Všeobecné požadavky [online]. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011. [cit. 2021/03/20].
- [58] ČSN EN 62109-2 Bezpečnost výkonových měničů pro použití ve výkonových fotovoltaických systémech - Část 2: Zvláštní požadavky pro střídače [online]. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012. [cit. 2021/03/20].
- [59] ČSN EN 62790 Připojovací skřínky pro fotovoltaické moduly - Bezpečnostní požadavky a zkoušky [online]. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015. [cit. 2021/03/20].
- [60] ČSN EN 62852 Konektory pro stejnosměrné použití ve fotovoltaických systémech - Bezpečnostní požadavky a zkoušky [online]. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015. [cit. 2021/03/20].
- [61] WOLF, P. Fotovoltaické elektrárny - od návrhu po realizaci [online]. Časopis Světlo, 2009. [cit. 2021/03/24]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/39403.pdf>.
- [62] Vyhláška o podmínkách připojení k elektrizační soustavě [online]. 2016. [cit. 2021/03/24]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2016-16>.
- [63] Zákon č. 458/2000, o podmínkách podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích a o změně některých zákonů (energetický zákon) [online]. 2000. [cit. 2021/03/24]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2000-458>.
- [64] Zákon č. 183/2006, o územním plánování a stavebním řádu (stavební zákon) [online]. 2006. [cit. 2021/03/24]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2006-183>.
- [65] Test fotovoltaických panelů 2018 [online]. Časopis dTest, 2018. [cit. 2021/03/24]. Dostupné z: <https://www.dtest.cz/clanek-6980/test-fotovoltaickych-panelu-2018>.
- [66] Obecné schéma zapojení fotovoltaického zdroje [online]. OEZ. [cit. 2021/03/25]. Dostupné z: <http://www.oez.cz/aktuality/obecne-schema-zapojeni-fotovoltaickeho-zdroje>.

- [67] ČSN 33 2000-1 ed. 2 *Elektrické instalace nízkého napětí - Část 1: Základní hlediska, stanovení základních charakteristik, definice* [online]. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009. [cit. 2021/03/27].
- [68] ČSN 33 1500 *Elektrotechnické předpisy. Revize elektrických zařízení* [online]. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1991. [cit. 2021/03/27].
- [69] *Revize a měření FV systémů* [online]. TREALS MP, s.r.o., 2009. [cit. 2021/03/27].
Dostupné z:
<https://www.trealms.cz/fotovoltaika/revize-a-mereni-fv-systemu/>.
- [70] KRÍŽ, M. *Dokumentace, zkoušky a kontroly fotovoltaiiky - ČSN EN 62446* [online]. iiSEL — Informační servis pro elektrotechniky, 2013. [cit. 2021/03/27]. Dostupné z:
<https://www.in-el.cz/referat/103219/dokumentace-zkousky-a-kontroly-fotovoltaiiky-csn-en-62446>.
- [71] *Kontrola fotovoltaiických panelů solárních elektráren* [online]. TELINK, 2019. [cit. 2021/03/27]. Dostupné z: <https://www.telink.eu/cs/Novinky-clanky/reference/kontrola-fotovoltaiickych-panelu-solarnich-elektren>.
- [72] *Photovoltaic System Monitoring* [online]. PVResources, 2017. [cit. 2021/05/20]. Dostupné z: <https://www.pvresources.com/en/inverters/monitoring.php>.
- [73] *Analýza metodou elektroluminiscence* [online]. Solartec MED s. r. o., 2015. [cit. 2021/05/20]. Dostupné z:
<http://www.pvtest.cz/cs/zkousky/analyza-metodou-elektroluminiscence>.
- [74] *Monitoring, servis a diagnostika FV elektráren* [online]. Solartec, s.r.o., 2012. [cit. 2021/05/20]. Dostupné z: <https://www.elektroprumysl.cz/alternativni-energie/monitoring-servis-a-diagnostika-fv-elektren>.
- [75] BAŘINKA, R. *Diagnostika solárních panelů* [online]. 2012. [cit. 2021/05/20]. Online prezentace. Dostupné z:
<https://docplayer.cz/2142029-Diagnostika-solarnich-panelu.html>.
- [76] *PVSyst* [online]. Photovoltaic Software. [cit. 2021/05/02]. Copyright PVSyst. Dostupné z: <https://www.pvsyst.com/download-pvsyst/>.
- [77] *PV*SOL® premium* [online]. Valentin Software. [cit. 2021/05/02]. Copyright 2021 Valentin Software GmbH. Dostupné z:
<https://valentin-software.com/en/products/pvsol-premium/>.

Seznam obrázků

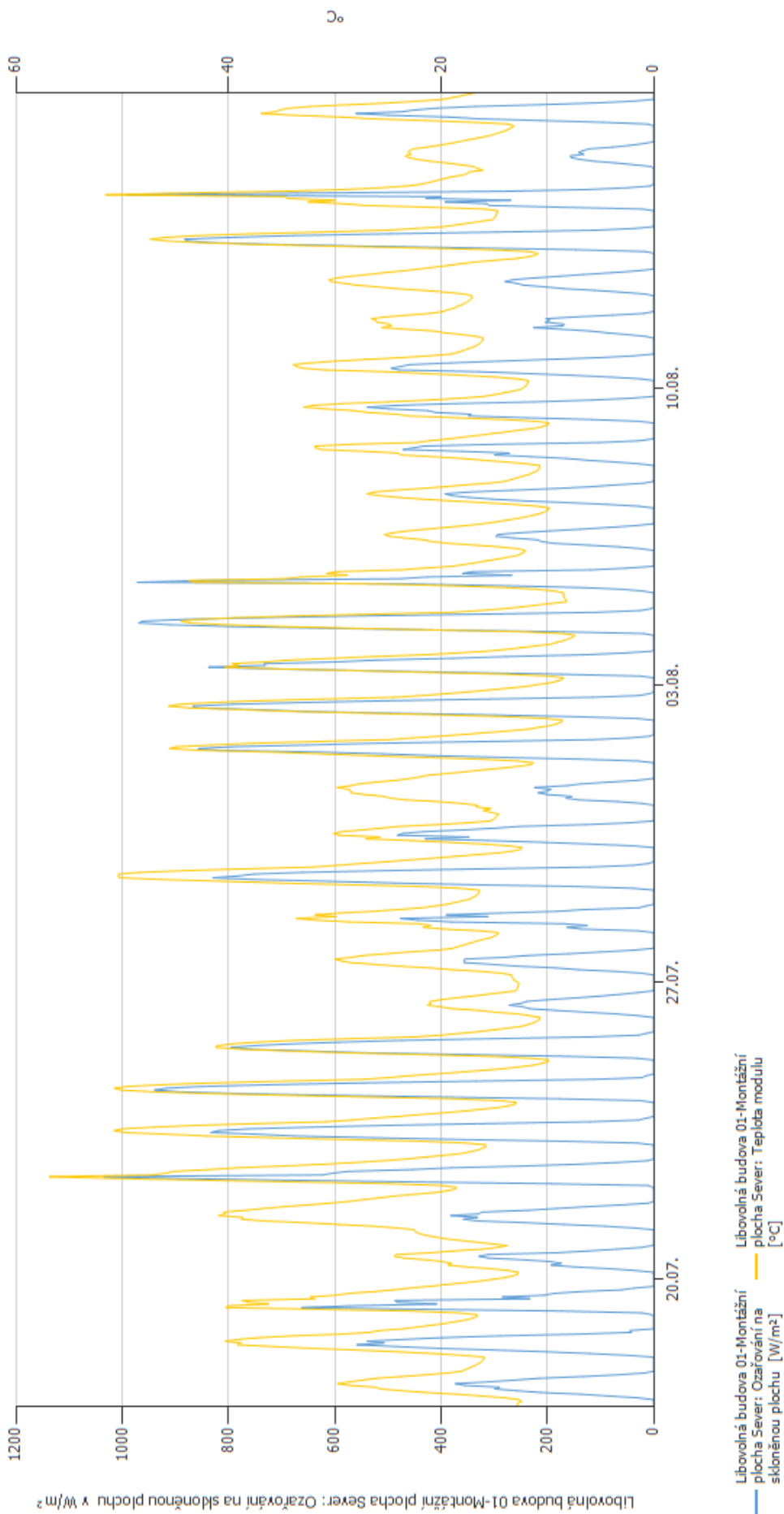
3.1	Typy křemíkových fotovoltaických panelů [1]	13
3.2	V-A a výkonová charakteristika fotovoltaického článku, upraveno z [3] .	13
4.1	Schéma zapojení ostrovního systému s elektrocentrálou [20]	20
4.2	Schéma zapojení hybridního systému [22]	21
4.3	Schéma zapojení fotovoltaického parku [25]	22
5.1	Problémové oblasti u FVE	23
5.2	Vznik elektrického oblouku [26]	25
5.3	Reakce V-A charakteristiky na nezjištěnou zemní poruchu, upraveno z [29]	27
5.4	Bypassové diody ve FV panelu se šedesáti články, upraveno z [33] . . .	28
5.5	Reakce V-A charakteristiky na nezjištěnou poruchu vedení, upraveno z [29]	29
5.6	Výkonová charakteristika, upraveno z [38]	30
5.7	V-A charakteristika, upraveno z [38]	30
6.1	Ukázkový požár střechy budovy s fotovoltaickými panely	35
6.2	Požárem poškozené fotovoltaické panely	38
7.1	Obecné schéma fotovoltaického zdroje s ochrannými prvky [66]	43
7.2	Revize fotovoltaického pole pomocí infračervené kamery [71]	46
7.3	Analýza metodou elektroluminiscence - tmavší místa značí vadný články [74]	48
7.4	Zadání parametrů komponentů FV systému v programu PVSyst	50
7.5	Ukázka prostředí 3D vizualizace v programu PV*SOL	51
7.6	Simulace zastínění modulů v programu PV*SOL	52
7.7	Koeficient výkonnosti během jednoho roku (PVSyst)	53
7.8	Energetický roční výnos	54
7.9	Globální efektivní ozáření na plochu	54
7.10	Porovnání venkovní teploty a teploty modulu	55
7.11	Porovnání ozařování na skloněnou plochu s ozařováním na horizontále .	56
8.1	Znečištěný panel	57
8.2	Usazování živých organismů v důsledku vlhkosti na rámech panelů . . .	58
8.3	Prasklina na panelu	59

8.4	a) Zkroucené kabely a b) volně visící, degradující kabel	60
8.5	Termo snímek a) přední a b) zadní strany panelu s vadným článkem . .	60
8.6	Vadné zkroucené konstrukce	61
8.7	Špatně umístěný spoj panelů	62
8.8	Lepší řešení umístění spoje panelů	62
8.9	Vadná konstrukce, která zapříčíná odrtžení panelů	63
8.10	a) Praskliny a rýhy od letících panelů a b) rozbitý panel	63
10.1	Porovnání ozařování na skloněnou plochu s teplotou modulu v létě (PV*SOL)	76
10.2	Porovnání ozařování na skloněnou plochu s teplotou modulu v zimě (PV*SOL)	77
10.3	Diagram ztrát FV systému (PVSyst)	78

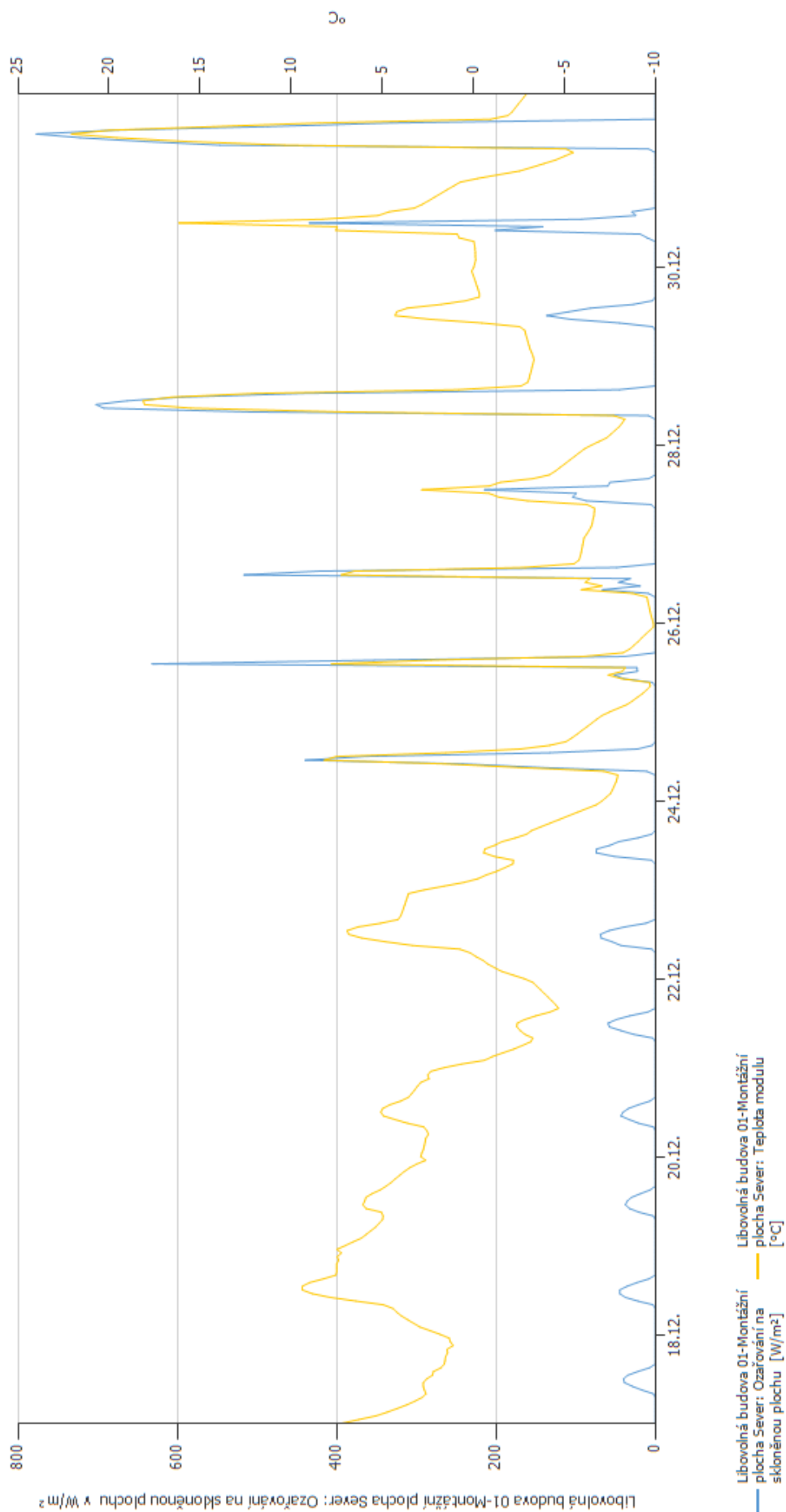
10 Přílohy

Příloha A - Grafické zobrazení výsledků simulace:

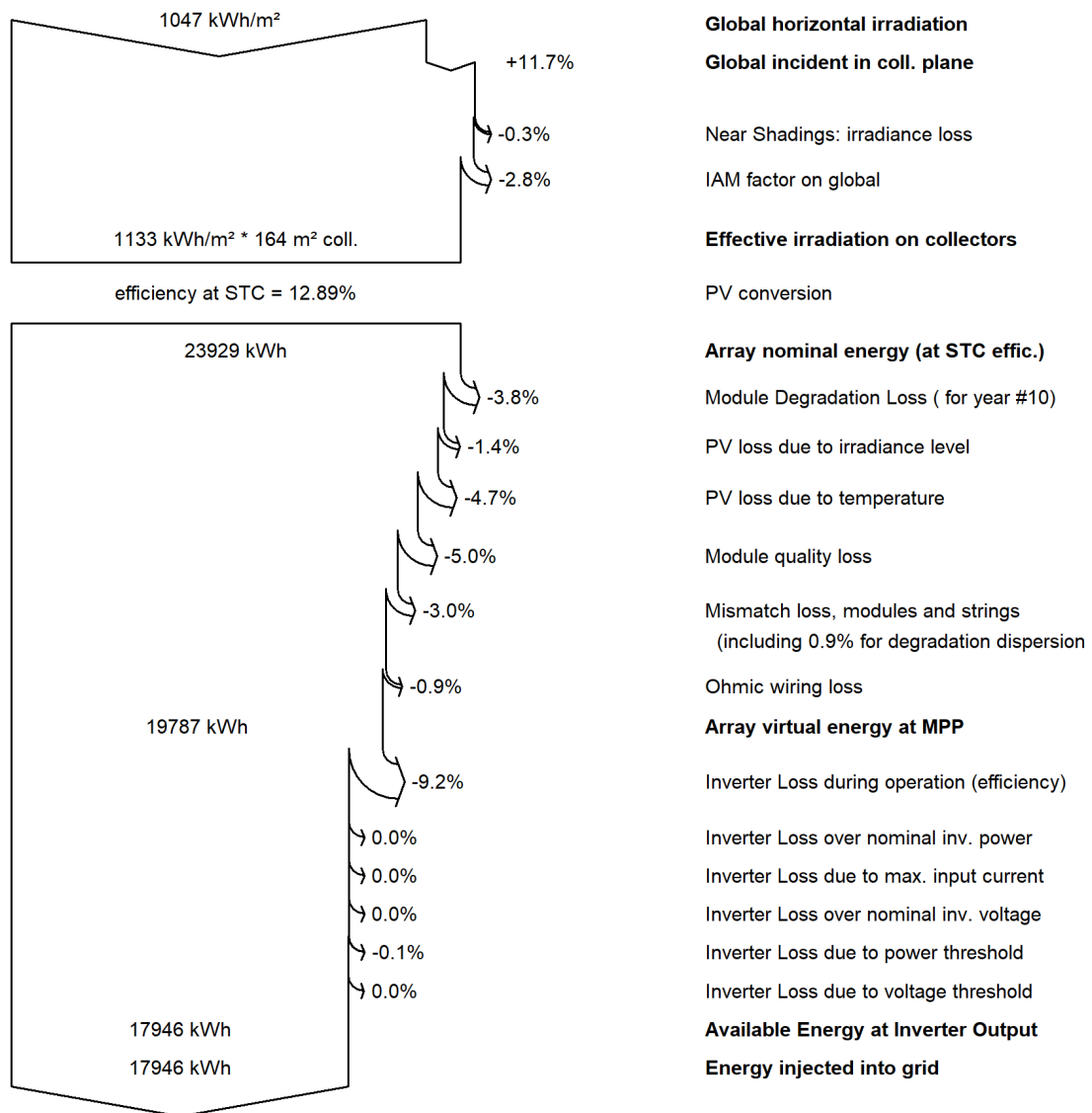
- obr. č. 10.1: Porovnání ozařování na skloněnou plochu s teplotou modulu v létě
- obr. č. 10.2: Porovnání ozařování na skloněnou plochu s teplotou modulu v zimě
- obr. č. 10.3 Diagram ztrát FV systému



Obr. 10.1: Porovnání ozáření na skloněnou plochu s teplotou modulu v létě (PV*SOL)



Obr. 10.2: Porovnání ozařování na skloněnou plochu s teplotou modulu v zimě (PV*SOL)



Obr. 10.3: Diagram ztrát FV systému (PVSystem)