

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektrotechnologie



Bakalářská práce

Predikce chování FV systémů z hlediska závad a poruch

Prediction of behavior of PV systems in terms of faults and
malfunction

Autor: Terezie Klášterková

Vedoucí práce: Ing. Pavel Hrzina, Ph.D.

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Praha 2024

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Klásterková** Jméno: **Terezie** Osobní číslo: **507232**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektrotechnologie**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Specializace: **Aplikovaná elektrotechnika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Predikce chování FV systémů z hlediska závad a poruch

Název bakalářské práce anglicky:

Prediction of behavior of PV systems in terms of faults and malfunctions

Pokyny pro vypracování:

- 1) Zpracujte přehled vad a poruch vyskytujících se na současných i historických fotovoltaických elektrárnách.
- 2) Realizujte systém pro automatizované ověřování vybraných poruch FV systému.
- 3) Definujte základní množinu doporučených parametrů, které je nutné u FV systému sledovat za účelem umožnění predikce selhání systému.
- 4) Vytvořte základní metodiku pro sběr dat.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Schröpferová Lenka, Ekonomické důsledky časového vývoje vad FVE (bakalářská práce)
- [2] Schröpferová Lenka, Predikce chování fotovoltaických systémů na konci jejich životnosti (diplomová práce)
- [3] KÖNTGES, Marc. Review of Failures of Photovoltaic Modules. 2014. IEA International Energy Agency. ISBN 978-3-906042-16-9.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Pavel Hrzina, Ph.D. katedra elektrotechnologie FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **19.01.2024**

Termín odevzdání bakalářské práce: _____

Platnost zadání bakalářské práce: **21.09.2025**

Ing. Pavel Hrzina, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Studentka bere na vědomí, že je povinna vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studentky

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracovala samostatně a že jsem uvedla veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 24.05.2024

Terezie Klášterková

Poděkování

Ráda bych touto cestou vyjádřila poděkování Ing. Pavlu Hrzinovi, PhD. za jeho cenné rady, doporučení a trpělivost při vedení mé bakalářské práce. Dále bych chtěla poděkovat svým kolegům, jmenovitě Ladislavě Černé, Tomáši Finsterlemu a Janu Kasperovi za pomoc při studiu, podporu a cenné rady.

Abstrakt

Předmětem této bakalářské práce je popis závad a poruch vyskytujících se na fotovoltaických (FV) elektrárnách a zhodnocení jejich důsledků na chod systému. V souvislosti s ověřováním stavu FV systému jsou definovány základní parametry, které je potřebné sledovat pro umožnění predikce selhání FV systému. Jako ukázka možného řešení metod ověřování stavu systému je v tomto případě ověřován izolační odpor FV modulu. Práce také představuje prototyp automatizovaného systému pro ověřování izolačního odporu FV modulů.

Klíčová slova: Vady a poruchy FVE, izolační odpor, monitoring

Abstract

The subject of this bachelor thesis is description of faults and malfunctions occurring in photovoltaic (PV) power plants and evaluation of their consequences on the operation of the system. In context with the verification of the state of the PV system, basic parameters are defined that need to be monitored in order to enable the prediction of the failure of the PV system. As an example of possible solution to the system status verification methods, the insulation resistance of the PV module is verified in this case. The work also presents a prototype of an automated system for verifying the insulation resistance of PV modules.

Keywords: Defects and faults of the PV system, insulation resistance, monitoring

Seznam obrázků

Obr. 1: Delaminace v blízkosti sběrnice (sběrací elektrody)	2
Obr. 2: Delaminace	2
Obr. 3: Porušená izolace	4
Obr. 4: Utržený box	4
Obr. 5: VA charakteristika FV modulu s bypassovými diodami přes různý počet článků	5
Obr. 6: VA charakteristika FV modulu s různým stupněm zastínění jednoho článku	5
Obr. 7: Velmi pokročilá degradace, ztráta výkonu více jak 2/3 původních hodnot	6
Obr. 8: PID	7
Obr. 9: VA charakteristika FV modulu	7
Obr. 10: Luminiscenční snímek modulu s prasklými články	8
Obr. 11: Prasklina v kombinaci se šnečími cestami	8
Obr. 12: VA charakteristika vlivu sériového odporu	9
Obr. 13: Šnečí cesty	10
Obr. 14: Vypálený FV článek	10
Obr. 15: Poškození chrániček	12
Obr. 16: Poškození izolace vodiče	12
Obr. 17: Poškozený konektor hlodavcem (laboratoř ČVUT FEL)	13
Obr. 18: Špatné upevnění kabelů (laboratoř ČVUT FEL)	13
Obr. 19: VA charakteristika FV modulu	14
Obr. 20: Snímek z termografie	16
Obr. 21: Nefunkčnost 1/3 článku	16
Obr. 22: Snímek z elektroluminiscence	17
Obr. 23: Histogram počtu poruch zohledňující klimatické oblasti	19
Obr. 24: Histogram počtu poruch v závislosti na roku instalace	20
Obr. 25: Počet poruch v závislosti na roku kontroly	20
Obr. 26: Histogram počtu poruch v závislosti na stáří systému	21
Obr. 27: Počet poruch v závislosti vlivu na výkon	21
Obr. 28: Histogram počtu poruch v závislosti na čase do poruchy podle vlivu na výkon	22
Obr. 29: Typy poruch s nejvyšší ztrátou výkonu v jednotlivých klimatických oblastech	23
Obr. 30: Nejvyšší průměrné rychlosti degradace dle poruch v jednotlivých klimatických oblastech	24
Obr. 31: Analýza získaných dat o poruchách „zadní strany“ (vlevo nahoře), „FV článku“ (vpravo nahoře), „obalu“ (vlevo dole) a „skla“ (vpravo dole) v závislosti na stáří systému	25
Obr. 32: Blokové schéma automatizovaného systému	31
Obr. 33: Schéma měřicího obvodu	32
Obr. 34: Příklad zápisu souboru Power_x	34
Obr. 35: Příklad zápisu souboru R_ref	34
Obr. 36: Vývojový diagram hlavní smyčky	34
Obr. 37: Vývojový diagram přerušení	34
Obr. 38: Zobrazení na webových stránkách	35
Obr. 39: Moduly na střeše Fakulty elektrotechnické	36
Obr. 40: Měřicí přístroj	36

Obsah

1	Vady a poruchy vyskytující se na FV modulech	2
1.1	Delaminace.....	2
1.1.1	Struktura sklo – EVA	2
1.1.2	Struktura EVA – FV článek	2
1.2	Ztráta adheze zadní strany.....	3
1.2.1	Sklo	3
1.2.2	Kovová fólie v polymerní struktuře	3
1.2.3	Polymerní struktura	3
1.2.4	Delaminace v blízkosti junction boxu	3
1.3	Porucha junction boxu	3
1.4	Bypass diody	4
1.5	Rozbití rámu	6
1.6	Zabarvení EVA fólie.....	6
1.7	PID.....	6
1.8	Praskliny FV článků	8
1.8.1	Zdroje prasklin při výrobě.....	9
1.8.2	Opakující se prasklina	9
1.8.3	Dendritický vzor prasklin	9
1.9	Snail trails	9
1.10	Hotspoty, spáleniny	10
1.10.1	Špatně připájené spoje	10
1.10.2	Stínění.....	10
2	Vady a poruchy jednotlivých prvků FV systémů	12
2.1	Střídač	12
2.2	Vodiče a chráničky	12
2.3	Konektory.....	12
2.4	Konstrukce.....	13
2.5	Senzory.....	13
3	Metody měření/kontroly.....	14
3.1	Vizuální kontrola	14
3.2	Voltampérová charakteristika	14
3.3	Výkonová analýza	15
3.3.1	VA charakteristiky	15
3.3.2	Vyhodnocení pomocí senzorů.....	15
3.3.3	Porovnání produkce s ostatními FVE v okolí.....	16
3.4	Termografie	16
3.5	Elektroluminiscence.....	16
3.6	Revize FVE.....	17

4	Statistiky	19
4.1.1	Vlivy na ztrátu výkonu	21
5	Monitoring	27
5.1	Parametry pro sledování a vyhodnocování	28
5.1.1	Výkon fotovoltaické elektrárny.....	28
5.1.2	Napětí systému.....	28
5.1.3	Distribuční síť – odběr/výkup.....	28
5.1.4	Akumulace energie.....	28
5.1.5	Další parametry	29
5.2	Ověřování vybraných poruch FV systému.....	29
6	Návrh systému pro automatizované ověřování izolačního odporu	30
6.1	Izolační odpor	30
6.2	Blokové schéma systému	31
6.3	Měřicí obvod	32
6.4	Kalibrace	33
6.5	Určení izolačního odporu.....	34
7	Měření	36
8	Závěr	37
9	Přílohy	40

Úvod

Fotovoltaické (FV) systémy moduly jsou klíčovými prvky v oblasti obnovitelných zdrojů energie. Nicméně jako každá technologie, i FV systémy a moduly jsou náchylné k různým závadám a poruchám, které mohou ovlivnit jejich výkon a životnost.

V dnešní době probíhá výstavba mnoha elektráren, a ještě více je jich už v provozu, a to i dlouhodobě. Vzhledem k tomu že jsou technologie náchylné k poruchám, je čím dál tím větší potřeba kontrol a případných oprav nebo výměn. Oprava nebo výměna? To záleží na typu poruchy a rozsáhlosti v rámci systému. Některé prvky se nevyplatí opravovat (cenově nebo energeticky náročné), a tudíž dochází rovnou k jejich výměně. Tato práce se věnuje více poruchám na modulech. V rámci zjišťování poruch je zde přiblíženo měření izolačního odporu, což zároveň souvisí s bezpečným provozem elektrárny.

Pro zjištění, zda elektrárna funguje správně, je důležité sledovat základní parametry. Ty nám mohou odhalit, zda je něco jinak a pomoci najít příčinu. Při sledování podrobných informací o elektrárně můžeme být schopni predikovat budoucí stav a funkčnost elektrárny. Vše záleží na množství dat získávaných z elektrárny a jejich možnosti a přesnosti vyhodnocení.

1 Vady a poruchy vyskytující se na FV modulech

1.1 Delaminace

Delaminací rozumíme ztrátu přilnavosti mezi jednotlivými vrstvami modulu – sklo, EVA fólie, aktivní vrstvy (FV články), zadní vrstvy. Jde o viditelný problém, který je obvykle způsoben vlivem kontaminace během výroby modulu, nedodržení teploty laminace, nebo vlivem klimatických faktorů. Ty pak mohou být ještě doprovázeny tvorbou vlhkosti a korozí. Delaminace může způsobit odraz dopadajícího světla a následné snížení proudu článku nebo i celého modulu, ale také poškození struktury, které může vést až ke ztrátě izolačního stavu modulu. Nejčastějším místem s výskytem delaminace je okolí EVA fólie. Mezi faktory ovlivňující odolnost těchto struktur patří teplota, vlhkost i UV záření.

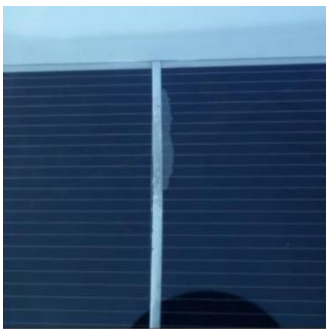
Veliký rozdíl je také mezi pozicemi, kde se porucha nachází. Pokud se delaminace objeví uprostřed modulu, nemusí mít dopad na výkon. Horším místem výskytu je okraj modulu. Při ztrátě přilnavosti může tudy vniknout do struktury voda a jiné nečistoty. To způsobí vytvoření cest pro vodu a vytvoření přímé elektrické cesty k zemi.

1.1.1 Struktura sklo – EVA

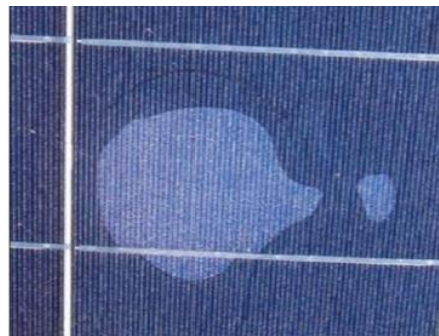
Při výskytu delaminace ve struktuře sklo – EVA není ohrožena elektrická část modulu. Dojde však ke snížení transparentnosti, článek se tedy chová jako zastíněný. Vlivem zastínění článku dochází ke snížení výkonu, který je modul schopný dodat.

1.1.2 Struktura EVA – FV článek

Naopak při výskytu ve struktuře EVA – FV článek může dojít ke vniku vody a následné poruše izolační vrstvy. To může způsobit zkrat v místě poruchy. Je zde tudíž riziko úrazu elektrickým proudem. Při vniku vlhkosti zároveň může docházet ke korozi spojů.



Obr. 1: Delaminace v blízkosti sběrnice
(sběrací elektrody)



Obr. 2: Delaminace

1.2 Ztráta adheze zadní strany

Zadní strana slouží jako ochrana elektrických prvků před venkovními podmínkami a k umožnění bezpečných manipulací za přítomnosti vysokého napětí. Zadní strany jsou tvořeny sklem a polymery, případně i kovovou fólií. Výběr materiálu závisí na ceně, mechanické síle, elektrické izolaci.

1.2.1 Sklo

Při použití samotného skla hrozí velké riziko vzniku prasklin, či jeho rozbití. To se může stát při nesprávné přepravě, většímu mechanickému namáhání nebo i v důsledku dopadu cizích předmětů. Rozbití skla má za následek prasklinu článku a může vzniknout elektrický oblouk. Při poruše v blízkosti různých spojů může opět dojít ke vzniku elektrického oblouku. V tomto místě pak v důsledku zvyšující se teploty může docházet k tavení skla, či spíše k jeho prasknutí vlivem tepelného namáhání.

1.2.2 Kovová fólie v polymerní struktuře

Zadní strana může být vytvořena přidáním kovové fólie do polymerní struktury. Výhodou je nízká hmotnost, částečná flexibilita spojená s funkcí zamezení vniku vlhkosti. Naopak musí obsahovat izolaci navíc, a to mezi FV články a již zmíněnou fólií. Při její poruše jinak dojde k nabití fólie napětím systému. Fólie se tak bude chovat jako vysokonapěťový kondenzátor s články jakožto druhou elektrodou.

1.2.3 Polymerní struktura

Nejběžnější provedení. Zadní strana obsahuje mnoho vrstev. Může tedy docházet k delaminaci mnoha struktur, a to jako odpověď na teplotu, mechanické namáhání, vlhkost, UV záření nebo namáhání fyzické a chemické. Při delaminaci také mohou vzniknout bubliny, které ale nepředstavují kritický problém. Oblast bubliny však bude nepatrně teplejší a dokud se nebude zvětšovat/šířit, jsou obavy ohledně účinnosti a bezpečnosti minimální.

1.2.4 Delaminace v blízkosti junction boxu

Dochází k mechanickému namáhání aktivních komponent což může mít za následek zničení. Při přerušení spojů u překlenovacích diod může vzniknout elektrický oblouk s velikostí napětí systému.

1.3 Porucha junction boxu

Junction box (JB) je umístěn na zadní straně modulu a chrání propojení modulu s externím zařízením. JB jsou tvořeny z plastů. Musí být odolný vůči klimatickým vlivům, mechanickému a tepelnému namáhání. Vyrábí se z nehořlavých materiálů nebo materiálů nešířící oheň.

Porucha:

- ❖ špatné uchycení boxu k zadní straně (špatná adheze nebo instalace)
- ❖ otevřený či špatně zavřený box (chyba ve výrobě/montáži)
- ❖ koroze konektorů vlivem vnikání vlhkosti
- ❖ porušená elektrická část (spoje, izolace vodičů) vedoucí k elektrickým obloukům, zkratům



Obr. 3: Porušená izolace



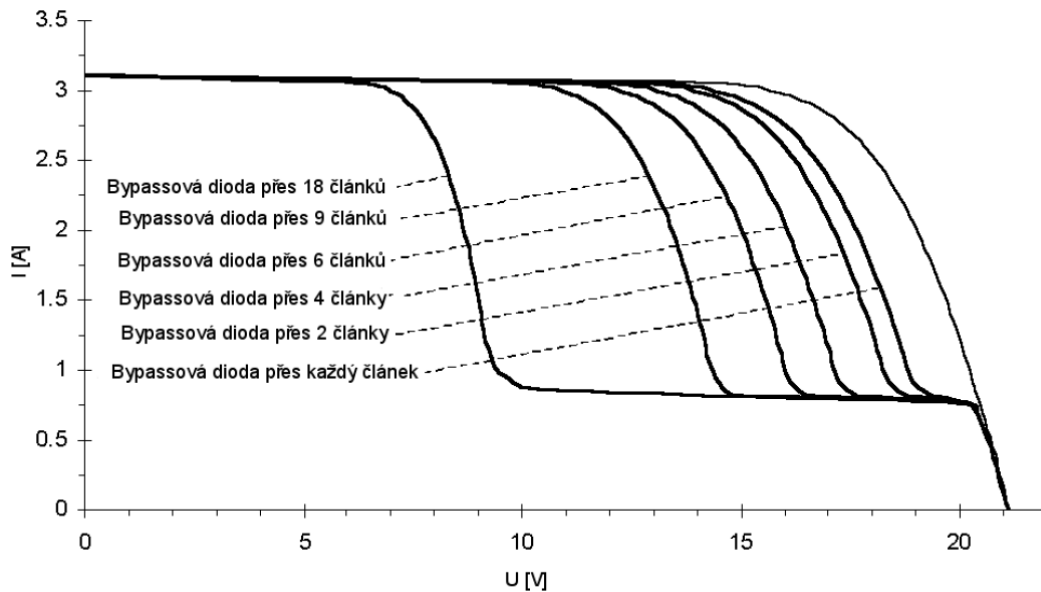
Obr. 4: Utržený box

1.4 Bypass diody

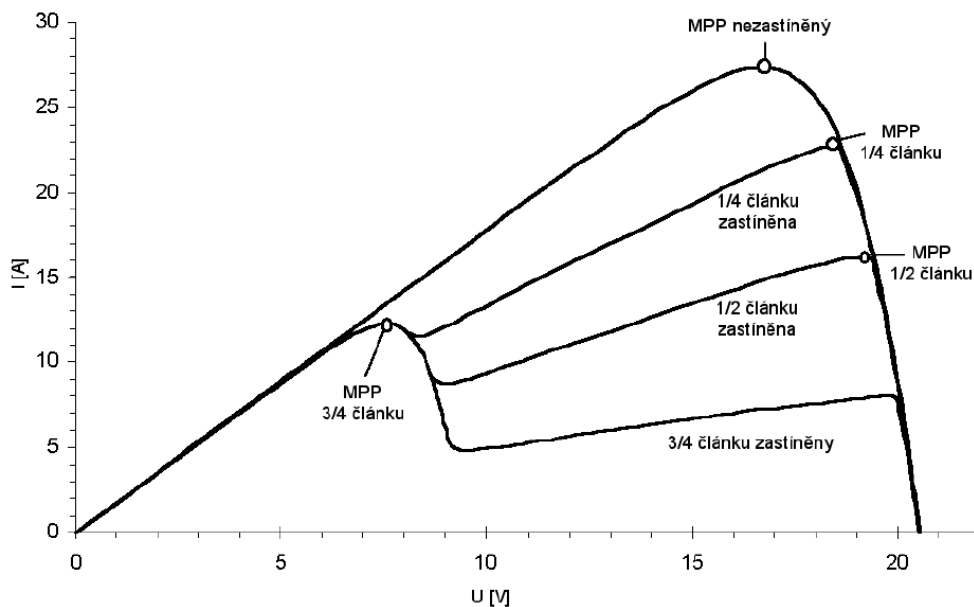
Bypass diody = překlenovací diody.

Slouží jako ochrana článků před tepelným zničením a značnému poklesu výkonu vlivem zastínění. Diody jsou připojeny paralelně k určitému počtu FV článků (obvykle 18 – 24). Nezapojují se ke každému FV článku. Bylo by to sice výhodné z hlediska výkonu, kdy se při zastínění neodstaví celá skupina, ale jen příslušný článek. Nevýhodou je pak stránka ekonomická (mnoho diod navíc) ale i fakt, že způsobují určitý ztrátový proud, což se projeví snížením výsledného proudu. Na grafu (Obr. 5) je vidět VA charakteristika, která se liší počtem překlenutých článků. Čím méně článků dioda překlenuje, tím se enormní pokles proudu posouvá k vyššímu napětí.

Diody odpojují (překlenují) FV články v momentu jejich zastínění nebo poškození a umožňují tím eliminovat pokles výkonu a proudu. Diody přecházejí do propustného směru při záporném napětí (kolem -0,6V, opět záleží na typu diod). Toto napětí se objeví, jakmile je napětí zastíněného článku rovno součtu napětí nezastíněných článků a napětí bypassové diody. Výkon modulu se výrazně mění na základě velikosti zastínění článku. S rostoucím zastíněním klesá proud (Obr. 6) a do jisté míry i napětí.



Obr. 5: VA charakteristika FV modulu s bypassevými diodami přes různý počet článků



Obr. 6: VA charakteristika FV modulu s různým stupněm zastínění jednoho článku

K selhání diod může dojít vlivem přehřátí nebo přetížení, případně odpojením nebo zkratem. Zároveň jsou namáhány zpětným proudem. Větší riziko selhání vzniká, pokud dochází ke stínění v době, kdy modul generuje vyšší výkon (tzn. během dne). Toto riziko lze minimalizovat, pokud není FV modul vystaven masivnímu trvalému zastínění.

Existuje selhání diod dvojího typu. Dioda může selhat a zůstat v rozpojeném stavu (chová se jako neexistující) nebo dojde k trvalému zkratu (chová se jako vodič s nízkým odporem). Hlavní příčinou je nevhodné dimenzování diod na zkratové proudy (ty způsobují nadměrné oteplení), případně špatné zapojení, ale také jejich trvalé zatížení (dlouhodobý jev). Selhání diod lze zjistit pomocí VA charakteristiky nebo termografií.

1.5 Rozbití rámu

Pokud dojde k rozbití rámu ať už z důvodu pádu modulu nebo mechanického přetížení, stává se modul nezpůsobilý a musí být vyměněn. K mechanickému přetížení dochází zejména v zimě, při hromadění sněhu na modulech. U modulu instalovaného pod určitým sklonem dovoluje povrch sněhu přesun na spodní část daného modulu. Ve spodní části tak může docházet ke snížení odolnosti a narušení integrity skla.

1.6 Zabarvení EVA fólie

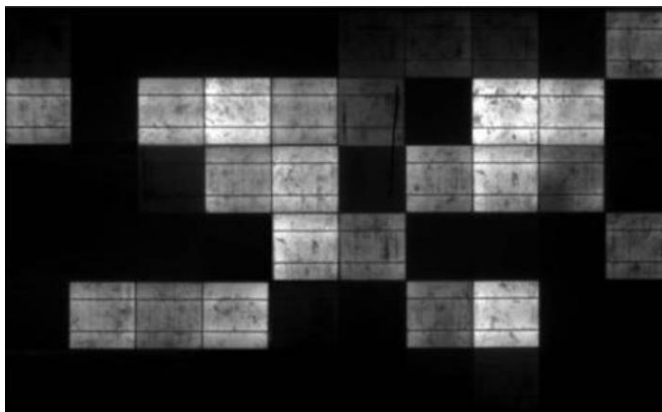
EVA = etylen vinyl acetát.

Jde o viditelný problém a může být rozpoznatelný ještě před projevením ztráty výkonu. Zabarvení může být důsledkem stárnutí fólie, ale i použitím neadekvátních aditiv, kdy se fólie stane po čase náchylnější ke zničení. Fólie bývá většinou tvořena UV a teplotními stabilizátory pro omezení daných vlivů na funkci. Při zabarvení se vytváří podstatná tepelná stopa, tvoří se kyselina octová, může docházet i ke křehnutí fólie. Vzniklé zbarvené vzory jsou často symetrické a dochází k nim vlivem rozptýlení kyslíku nebo kyseliny octové vytvořené při interakci UV záření s fólií. Zabarvení může doprovázet snižování optické transparentnosti, což může mít opět za následek snížení výkonu modulu.

1.7 PID

PID = Potencial Induced Degradation = Potenciálem Indukovaná Degradace.

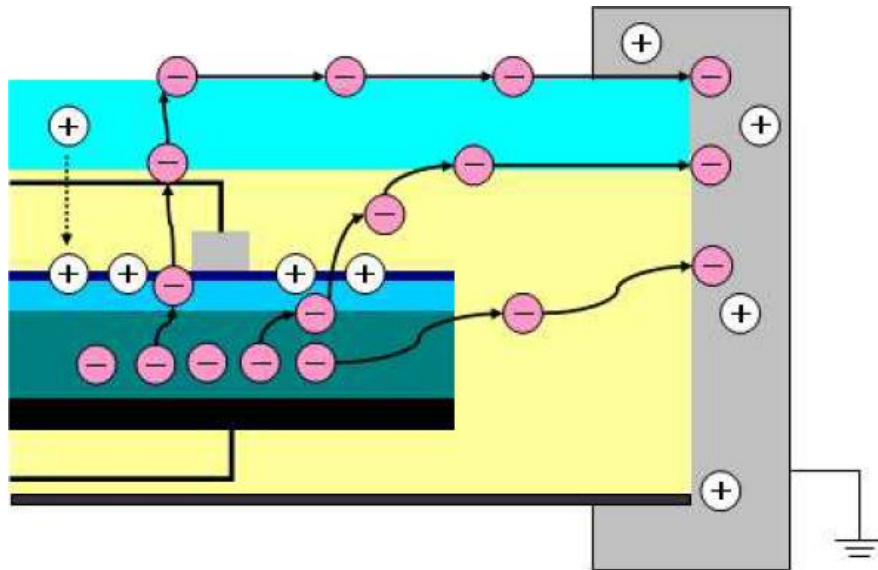
Jde o nevizuální poruchu, kterou lze zjistit pomocí termografie a elektroluminiscence (Obr. 7).



Obr. 7: Velmi pokročilá degradace, ztráta výkonu více jak 2/3 původních hodnot

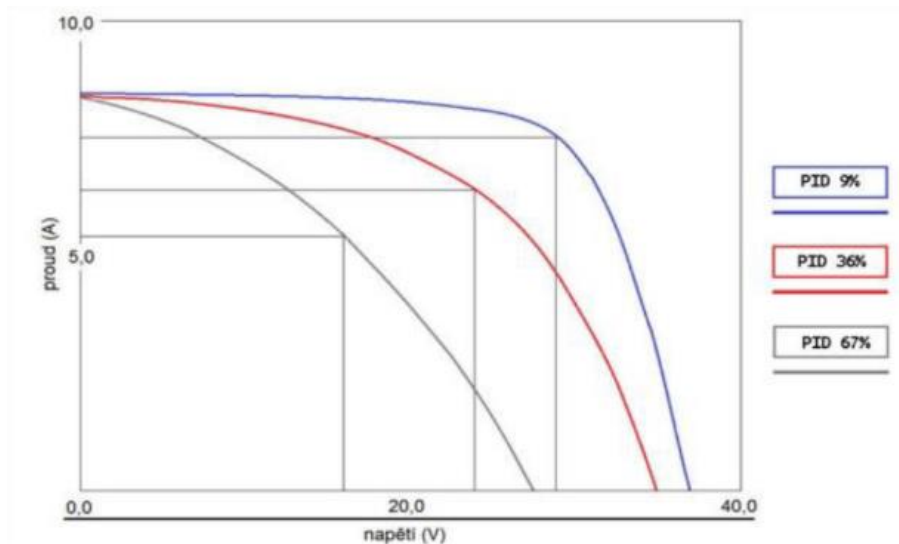
Jedná se o mezivrstvou polarizaci vedoucí až k nevratné degradaci křemíku související s rozdílem potenciálů vůči zemi. PID způsobuje nevhodnou změnu rozložení nosičů náboje FV článku, který tak díky tomu není schopen dodávat elektrický proud. K jevu dochází zejména na FV modulech, které jsou nejbližší záporného pólu ve stringu. Potenciál FV článků se pohybuje u starších systémů v rozmezí od -250 V až -450 V (záleží na délce stringu, typu použitého střídače). Rám je uzemněn, tudíž má potenciál 0 V . Kvůli elektrickému napětí mezi FV články a

rámem může dojít ke vzniku svodových proudů. Jev zanechá náboj (kladné sodné ionty), který může nevhodným způsobem pozměnit charakteristiku FV článku. Svodový proud (Obr. 8) je způsoben napěťovým potenciálem a způsobují jej elektrony (-) (růžová) z FV článků a pozitivní (+), (bílá) ionty migrující ze struktury skla vlivem vnějšího prostředí.



Obr. 8: PID

Z VA charakteristiky (Obr. 9) je patrné, že se zvýšením procentuálního zastoupení PID efektu v modulu klesá napětí. Bod maximálního výkonu se tak posouvá níže, a tak klesá i celkový výkon modulu.



Obr. 9: VA charakteristika FV modulu

Příčinou může být mnoho FV článků zapojených do série. Čím více je zapojených modulů ve stringu, tím je riziko degradace a výsledný úbytek výkonu vyšší. Další příčinou může být použití galvanicky neodděleného střídače, kde nemůže být záporný pól stringu uzemněn.

Vysoká teplota a vlhkost způsobuje urychlení degradačního efektu. Jedná se o jev, který lze zvrátit (částečně). Jednou z možností je přiložení opačného napětí, čímž způsobíme opačný směr migrace iontů. K regeneraci modulů napomáhají nízké teploty a vlhkost. Lze tak dosáhnout

částečného návratu k původním hodnotám FV modulu. V případě dlouhodobého působení jevu dochází k pronikání sodných iontů do struktury článku. Tento jev je pak vratný jen velmi omezeně.

1.8 Praskliny FV článků

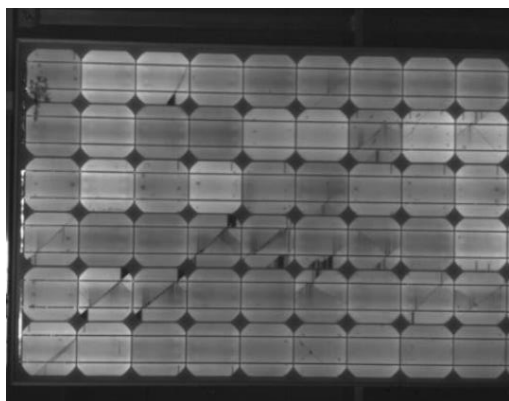
FV články jsou z křemíku, a tudíž jsou velice křehké. Praskliny se vytvářejí v křemíkovém substrátu. Nemusí být pozorovatelné při vizuální kontrole (mikropraskliny). V článku se vyskytují s různou velikostí i orientací.

Vznik prasklin:

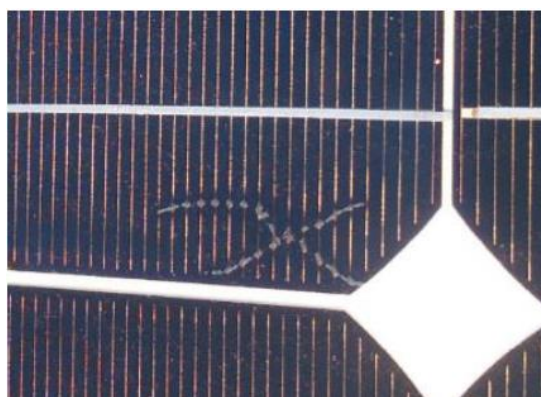
- ❖ praskliny vzniklé během výroby (výroba článků, spojování článků do modulu)
- ❖ praskliny vzniklé při transportu a překládání
- ❖ praskliny vzniklé při instalaci (pád modulu, mechanické přetížení modulu)
- ❖ praskliny vzniklé při provozu (důsledek zátěže ve formě sněhu nebo špatného konstrukčního řešení – pnutí působící na modul)

Z mikropraskliny se po čase může stát viditelná prasklina a je pravděpodobné že se bude během provozu stále zvětšovat. Ke zvětšování praskliny dochází vlivem mechanického namáhání (vítr, sníh...) a teplotně mechanického namáhání (výrazná změna teploty, změna počasí...).

Veliká prasklina, teplotní a mechanická námaha, vlhkost, to vše může vést k „mrtvé“ - neaktivní části článku a následné ztrátě výkonu. Neaktivní články dále nepřispívají k výrobě elektrické energie.

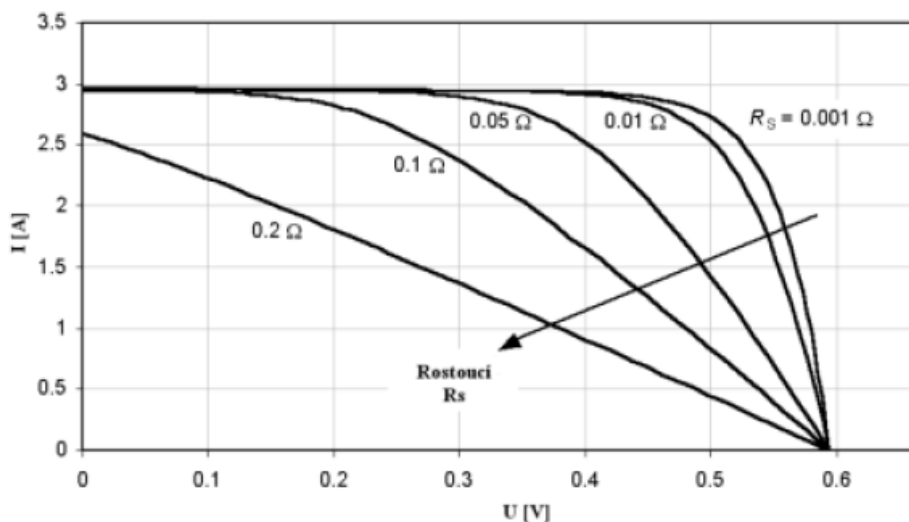


Obr. 10: Luminiscenční snímek modulu s prasklými články



Obr. 11: Prasklina v kombinaci se šnečími cestami

Ulomené články mají pak vliv na účinnost modulu. Čím větší plocha je ulomena (chybí), tím je i větší ztráta výkonu. Pokud je u ulomených článků poškozeno spojení, zvyšuje se zároveň hodnota sériového odporu. Čím vyšší hodnota sériového odporu, tím nižší výkon modulu (Obr. 12).



Obr. 12: VA charakteristika vlivu sériového odporu

1.8.1 Zdroje prasklin při výrobě

Praskliny začínající ve spojích článků jsou způsobené zbytkovým namáháním po pájení. „Cross crack“ je prasklina skrze celý článek. Bývá způsobena tlakem jehel při výrobě. Prasklina začínající na kraji článků je způsobena nárazem cizího objektu, či pádem.

1.8.2 Opakující se prasklina

Dochází k vytvoření pravidelně se opakující praskliny. Je to způsobeno výrobní chybou, a to před laminací. Tento typ prasklin se po laminaci vytvořit nemůže.

1.8.3 Dendritický vzor prasklin

Dendritický vzor = stromovitě větvcí.

Je způsoben mechanickou zátěží – špatné balení při přepravě, pád modulu paralelně k zemi, těžký sněh. Praskliny jsou zde vytvořeny až po laminaci (ne při výrobě). FV moduly s tímto typem praskliny vykazují větší ztrátu výkonu při humidity-freeze testu než moduly s ostatními typy prasklin.

1.9 Snail trails

Snail trails = šnečí cesty.

Možné objevit vizuální kontrolou. Jde o šedá/černá zbarvení stříbrných spojů pod laminační vrstvou. Vytvářejí se většinou společně s prasklinami (nemusí být viditelné) nebo mikroprasklinami (nejsou viditelné). Rychlost zbarvení spojů je ovlivněna ročním obdobím a okolními podmínkami (teplo...). Při vytvoření šnečích cest dochází k reakci stříbra a polymeru – sloučeniny se rozpustí a skrz mikropraskliny v Tedlaru se dostane vlhkost až ke stříbrným spojům.

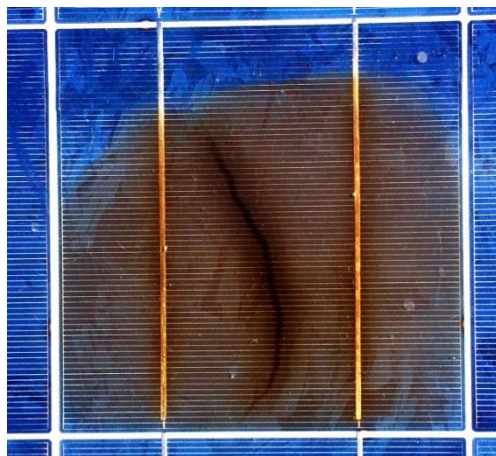
Tam pak vzniká vnitřní chemická reakce s následnou migrací stříbra. Důležitý je tedy výběr materiálů pro EVA fólii a zadní krycí vrstvu. Samotné šnečí cesty nezpůsobují ztrátu výkonu.



Obr. 13: Šnečí cesty

1.10 Hotspoty, spáleniny

Běžná vada spojená s velmi teplými částmi modulu. Hotspoty jsou horká místa vznikající na celém modulu, a to buď jednotlivě nebo ve skupinách. Vysoká teplota může poškodit strukturu dalšího článku, čímž se vada posunuje nebo zvětšuje. Vada se v počátečním stádiu nedá zjistit vizuální kontrolou, je zapotřebí využít termografie nebo elektroluminiscence. Příčin je opět více – špatně připájené spoje, stínění, praskliny.



Obr. 14: Vypálený FV článek

1.10.1 Špatně připájené spoje

Spoje jsou při průchodu proudu tepelně namáhány. Při rozpadu spoje se při stálém průchodu proudu zvyšuje teplota a díky tomu roste odpor spoje. Teplota se bude zvyšovat až dosáhne hodnoty, která bude dostatečná k degradaci materiálu a tím změně barvy pouzdra.

1.10.2 Stínění

Stíněný článek se chová jako spotřebič. Dochází tak ke spotřebě energie (přeměna na teplo) místo její výroby.

Důsledkem můžou být nejen horká místa, ale v krajním případě i požár. Může totiž dojít k zahoření vadného článku v důsledku vysoké teploty. Článek se v průběhu ohřívání zabarvuje. Může také docházet k přerušení vodivých cest, což znamená zamezení toku proudu a poklesu výkonu celého modulu. Případně může dojít ke vzniku elektrického oblouku. Tepelné ztráty jsou pak definovány jako

$$P = R \cdot I^2 \text{ [W]} \quad (1)$$

2 Vady a poruchy jednotlivých prvků FV systémů

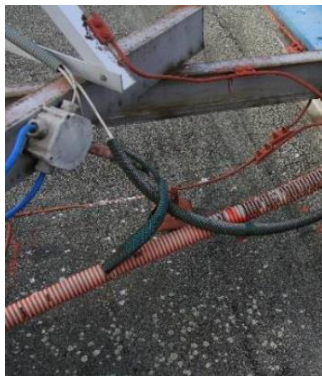
2.1 Střídač

Střídač je nejkompexnější jednotkou celého systému. Zajišťuje přeměnu stejnosměrného napětí na napětí střídavé. Vzhledem ke komplexnosti zařízení se zde vyskytuje mnoho poruch. Nejčastější selhání se vyskytuje u kondenzátorů a tranzistorů, další mohou být rezistory, diody, konektory a další. K selhání dochází vlivem vnějších a vnitřních příčin. Mezi selhání z důvodu vnějších příčin lze zařadit provozní chybu, nesprávné nastavení parametrů, nadměrné zatížení, poškození ventilátorů, vysoká teplota nebo problémy samotné elektrické sítě. Mezi vnitřní důvody pak patří zkrat, poškození uzemňovacího prvku, poškození izolace, špatné kontakty konektoru atd.

Střídače by tak měly být pravidelně kontrolovány odborníky, a to po stránce vizuální a elektrické. Po vizuální stránce dochází ke kontrole základní desky (zabarvení, konektory...), nejsou žádoucí jakékoliv koroze. Dále lze za použití termokamery zkontrolovat vodiče a konektory, kde hrozí riziko přehřívání, a kondenzátory. Častým problémem jsou i filtry, které chrání střídače před prachem. Po stránce elektrické je vhodné proměřit vstupy a výstupy.

2.2 Vodiče a chráničky

Vodiče jsou testované proti UV záření a na odolnost vůči ozonu a ohni. Pro stavbu FV elektráren se využívají solární kabely. Ty jsou většinou umístěny v ohebných hadicích či chráničkách, které předcházejí poruše nebo degradaci. Problém však může nastat při mechanickém poškození. To může vzniknout díky špatnému umístění vodičů a jejich následnému namáhání v ohybu nebo výskytem hlodavců.



Obr. 15: Poškození chrániček



Obr. 16: Poškození izolace vodiče

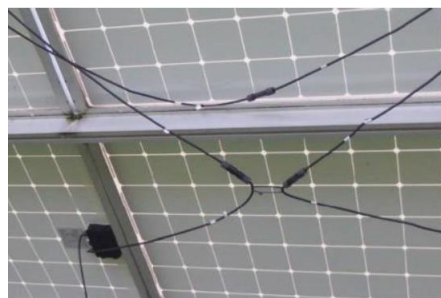
2.3 Konektory

Slouží k propojení jednotlivých komponentů. Nejpoužívanějším typem je MC4 a MC3. Vyrábí se z odolných plastů s odolností proti UV záření a vodě. Možné poškození z důvodu špatného upevnění na konstrukci (dochází k tahu), špatně zasunutých konektorů či poškození hlodavcem.

Nejčastější problém však vzniká při krimpování, kdy dojde k nesprávnému nasazení vnitřního kovového plíšku na vodič.



Obr. 17: Poškozený konektor hlodavcem
(laboratoř ČVUT FEL)



Obr. 18: Špatné upevnění kabelů
(laboratoř ČVUT FEL)

2.4 Konstrukce

Většina konstrukcí pro uchycení modulů je z hliníku, tedy nepodléhá korozi. Dalším často používaným materiálem je pozinkovaná ocel, zde již může časem dojít ke korozi, která má za následek snížení mechanické odolnosti konstrukce a přenosu mechanického namáhání na rám modulu s následným mechanickým poškozením. Problémem mohou být i spojovací části (šrouby...), které občas bývají nahrazeny levnou variantou, a tudíž i nekvalitními materiály a může opět docházet ke korozi.

2.5 Senzory

Využívají se pro kontrolu okamžitého výkonu a vyrobené energie. Senzory získávají informace o klimatických vlivech, hlavně o vlivech ovlivňujících výkon (teplota, intenzita záření...). Ze získaných informací pak lze vyhodnotit stav elektrárny. Využívá se několik typů senzorů.

Teplotní odporový senzor Pt1000 se využívá pro měření teploty modulu i okolí. Jedná se o poměrně stabilní součástku instalující se na zadní straně modulu. Anemometr slouží pro měření rychlosti proudění vzduchu. Pro měření ozářenosti se využívá pyranometr v kombinaci s referenčním FV článkem.

Pyranometr slouží k měření globálního záření – přímé a difuzní záření. Pracuje na principu termoelektrického jevu. Jeho nevýhodou je dlouhá doba odezvy, v řádech sekund. Naopak u referenčního FV článku je doba odezvy krátká, a to v řádech milisekund. Pod pojmem referenční FV článek si lze představit kalibrovaný FV článek. Nemůžou chybět, tak jako u jakéhokoliv elektrického zařízení, ani poruchy (přehřátí, zkrat, mechanické zničení...). Všechny senzory by se měly pravidelně kalibrovat pro zachování přesnosti a správnosti údajů. Pravidelná kalibrace by měla být u článku častěji na rozdíl od pyranometru, který bývá stabilnější.

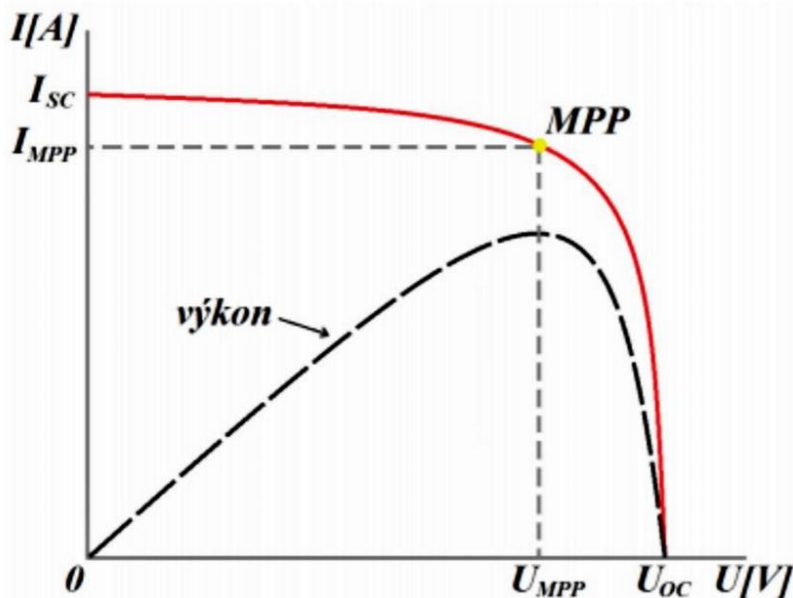
3 Metody měření/kontroly

3.1 Vizuální kontrola

Jedná se o nedestruktivní zkoušku, při které dochází ke zjišťování viditelných problémů. Zároveň se jedná o nejběžnější a nejlevnější způsob kontroly. Mezi viditelné problémy patří např. delaminace, praskliny, znečištění, degradační procesy konstrukce a vodičů. Vizuální kontrolu lze provádět při každé návštěvě elektrárny, podmínkou je zaškolení zaměstnanců v rozpoznávání a způsobu reportingu zjištěných vad.

3.2 Voltampérová charakteristika

Opět jde o nedestruktivní měření. Spočívá v připojení řízené zátěže na řetězec nebo samostatný modul a následném proměření závislosti $i = f(u)$ a $p = f(u)$. Měření se provádí ze stavu nakrátko do stavu naprázdno. Výsledkem jsou pak hodnoty proudu nakrátko I_{SC} a napětí naprázdno U_{OC} společně s proudem v maximálním bodě I_{MPP} a napětí v maximálním bodě U_{MPP} (Obr. 19). Ideální měření probíhá při standardních testovacích podmínkách (STC). STC je definováno ozářeností 1000 W/m^2 , spektrem AM1,5 a teplotou modulu $25 \text{ }^\circ\text{C}$. V laboratoři tohoto lze jednoduše dosáhnout a měříme tzv. flashtestem.



Obr. 19: VA charakteristika FV modulu

Pokud není možné modul přesunout do laboratoře, je možnost využít solární analyzátoř, které jsou doplněny o senzory ozářenosti a teploty. Následuje porovnání charakteristiky změřené a charakteristiky udávané výrobcem. Přesnost měření je zatížena chybou. Pro laboratorní podmínky je chyba menší, mezi 2–3 %. Ve venkovním prostředí je chyba větší, provádí se následná korekce hodnot, v rozmezí 7–10 %. Pro přesnost údajů je potřeba provést měření vícekrát.

3.3 Výkonová analýza

Závady a poruchy lze zjistit analýzou výkonových dat. Mezi nejjednodušší a nejpřesnější zařízení patří elektroměr. Ten měří vyrobenou elektrickou energii, ale je nutné vědět, z jaké části FVE data jsou. Zároveň je vhodné používat pokročilé „elektroměry“ se záznamem dat v kratších časových intervalech.

3.3.1 VA charakteristiky

Běžně používanými zařízeními pro měření výkonu na poli jsou UI analyzátoři. Výhodou je možnost využití přímo na místě instalace, bez nutnosti demontáže modulu. Zařízení provede zátěžový test a následně vykreslí průběh VA charakteristiky. Zařízení také změřené hodnoty převádí na hodnoty STC a porovnává je s hodnotami uvedenými na štítku. Nevýhodou měření výkonu na poli je závislost na počasí (větší nepřesnost).

3.3.2 Vyhodnocení pomocí senzorů

Vyhodnocení pomocí senzorů

Využívání senzorů intenzity záření a teploty. K vyhodnocení se používá výpočet provozního výkonu PR (performance ratio). Jde o podíl skutečného energetického výnosu E_{SKUT} ku teoreticky možnému energetickému výnosu E_{TEOR} .

$$PR = \frac{E_{SKUT}}{E_{TEOR}} = \frac{E_{SKUT}}{IG \cdot A \cdot \eta} [-] \quad (2)$$

IG ... měrná suma dopadu globálního záření [kWh/m²]

A ... plocha systému [m²]

η ... účinnost modulů [%]

Lze použít i vztah respektující teplotní korekci.

$$PR = \frac{\frac{E_{OUT}}{C_k}}{\frac{H_i}{G_{i,ref}}} [-] \quad (3)$$

$$C_k = 1 + \gamma (T_{mod,k} - T_{ref}) \quad (4)$$

E_{OUT} ... vyrobená energie proměřená z AC strany [kWh]

P_0 ... instalovaný výkon [kW]

H_i ... měřená suma dopadu globálního záření [kWh/m²]

$G_{i,ref}$... referenční hodnota intenzity záření [W/m²]

$T_{ref} = 25$ °C (hodnota použita při STC)

$T_{mod,k}$... teplota modulu

γ ... korekční koeficient, obvykle o hodnotě -0,3 %/K

Ukazatel PR se vynáší do grafu v závislosti na časovém úseku (měsíc, rok). Hodnota PR je pro dobré systémy rovna 80 %. Lze tak odhalit výpadky, či zhoršenou provozní schopnost systému.

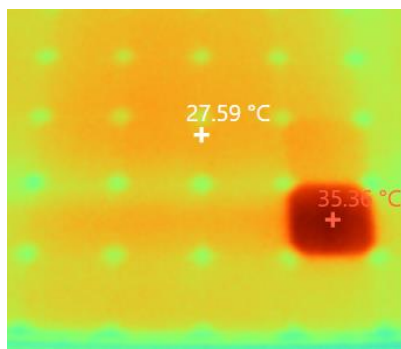
3.3.3 Porovnání produkce s ostatními FVE v okolí

Pro porovnání produkce mezi vlastní FVE a FVE nacházející se přibližně v okruhu 100 km. Využívá se v momentě, kdy nejsou instalovány senzory ozáření, teploty a nejsou k dispozici odchylky od průměrné hodnoty. Je také potřeba při porovnávání provést případnou korekci pro odlišné uspořádání FVE, ať už jde o sklon a natočení modulů nebo velké rozdíly vzniklé odlišnou nadmořskou výškou a charakterem krajiny.

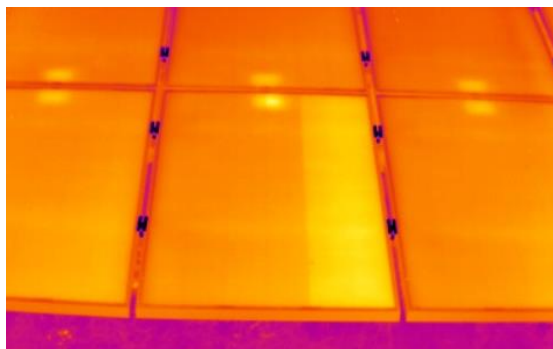
3.4 Termografie

Je to opět nedestruktivní měření. Jde o termografické měření pomocí bezkontaktní infračervené kamery. FVE musí být při měření v plném provozu. Při měření se hledají rozdíly teplot, které signalizují ztrátové teplo a tím i závadu či poruchu. Provádí se měření nejen samotných FV modulů, ale i JB, vodičů, rozvaděčů ... Pro získání validních výsledků měření je nutné správně zvolit emisivitu povrchu (schopnost tělesa vyzařovat teplo). Avšak pro vyhodnocení měření je důležitější právě rozdíl teplot.

Měření by mělo probíhat za stálých podmínek – stálá hodnota iozáření. Moduly pak měříme ze zadní strany, a to z důvodu chybějícího odrazu od skla či zastínění. Výslednou podobu snímků ovlivňuje ozáření, ochlazování větrem, úhel snímání, prach a jiné nečistoty na povrchu. K nejběžnějším viditelným poruchám patří hotspots (Obr. 20), což je jedna nebo několik buněk s vyšší teplotou. Může jít také ale o pouhé zakrytí listím, trávou nebo nečistotami. Další běžnou závadou je nefunkčnost 1/3 modulu (Obr. 21).



Obr. 20: Snímek z termografie

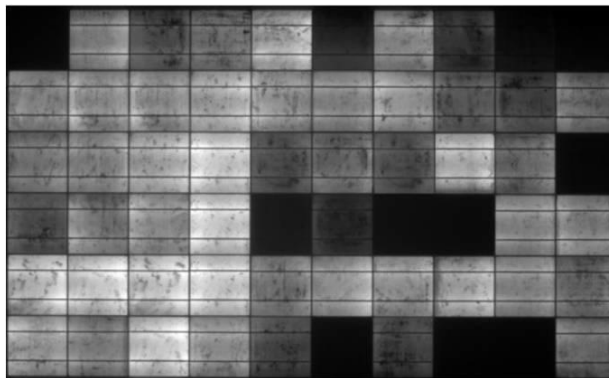


Obr. 21: Nefunkčnost 1/3 článku

3.5 Elektroluminiscence

Je nejlepší metodou sloužící k odhalování výrobních vad FV modulů. Jde o finančně nákladnou metodu z důvodu potřeby externího zdroje a nutnosti vytvoření tmavé komory nad FV modulem, případně lze snímat v noci (denní měření je také možné, nicméně vyžaduje speciální metodu a nákladné filtry). Při elektroluminiscenční kontrole je využíván jev opačný k jevu fotovoltaickému.

Do FV modulů je přiveden elektrický proud a modul jeho přechodem vyzařuje záření s vlnovou délkou kolem 1100 nm. Uvedená vlnová délka se nachází mimo viditelné spektrum, tudíž se využívá pro záznam speciálně upravená CCD kamera. Další možností pro zobrazení je použití InGaAs kamery s lepší kvantovou účinností pro dané pásmo. Tato metoda umožňuje zviditelnit skryté výrobní vady, například prasklé články nebo vadné kontakty. Získané snímky jsou ve stupních šedi (Obr. 22) nebo falešných barvách. Místa, kterými neprochází elektrický proud (nedodávají žádnou energii) jsou na snímcích zobrazeny černě.



Obr. 22: Snímek z elektroluminiscence

3.6 Revize FVE

Provedení revize kvalifikovaným revizním technikem. Před samotnou revizí je potřeba nastudovat projektovou dokumentaci (PD), manuály a návody výrobců prvků FVE. Součástí revize FVE je nejen elektrická bezpečnost, jde o kompletní posouzení bezpečnosti FVE. Je to posouzení, zda je FVE nainstalována dle všech požadavků uvedených v PD – elektrické parametry, uchycení modulů, odstupy od hořlavých hmot, odstup od hromosvodu, přístupnost prvků pro následnou údržbu atd.

Při revizi FVE by měla být použita technická norma ČSN 33 2000-7-712 Elektrické instalace budov Část 7-712 Zařízení jednoúčelová a ve zvláštních objektech – Solární fotovoltaické (FVE) napájecí systémy a zejména ČSN EN 62446-1+A1, která popisuje potřebnou dokumentaci a prováděné zkoušky celého systému. Mezi specifické úkoly normy patří jak vyhodnotit ochranu před úrazem elektrickým proudem, před nebezpečím požáru a nebezpečím zranění osob v důsledku mechanických působení a účinků jiných vnějších vlivů.

Pokud je to relevantní, musí být provedeny následující zkoušky, a to v následujícím pořadí:

- ❖ zkoušky všech střídavých obvodů podle požadavků ČSN 33 2000-6
- ❖ prohlídka stejnosměrného systému
- ❖ spojitost ochranných vodičů/vodičů ekvipotenciálního pospojování, pokud jsou instalovány
- ❖ ověření polarity
- ❖ zkouška napětí naprázdno
- ❖ zkouška zkratového proudu
- ❖ funkční zkouška
- ❖ izolační odpor stejnosměrných obvodů

Požadavky na samotné FV moduly jsou pak obsahem normy ČSN EN IEC 61215-1 ed. 2. Dokument je typovou normou, která stanovuje požadavky na provedení konstrukce zemských fotovoltaických modulů vhodných pro dlouhodobý provoz ve venkovním prostředí.

Doplněním revize pak může být diagnostika FVE, což je specializovaný soubor měření určený pro FVE. Předně jde o VA charakteristiku, termovizní měření atd.

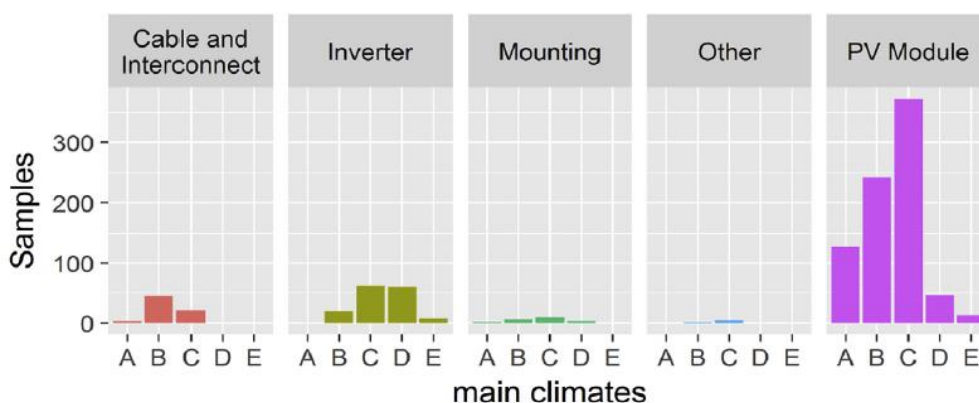
4 Statistiky

Vzhledem ke stále častějšímu výskytu poruch a závad ve FV systémech jsou získávána data o poruchovosti jednotlivých částí. To nám umožňuje upravovat a vyvíjet části FV elektrárny, které jsou častěji závadné. Data zároveň poskytují informace, kterým částem FV elektrárny je potřeba se více věnovat, aby nedocházelo k poruše.

Statistiky jsou málo dostupné a zároveň je málo dat vzhledem k relativně novým elektrárnám. Kvůli nedostatku dat jsou níže uvedené statistiky převážně z jedné studie. Pro predikci chování FV systému je potřeba tato data mít. I předkládaná bakalářská práce bude tak do budoucna směřovat k získávání dostatečného množství dat pro následné vyhodnocení.

Všechny níže uvedené statistiky a data jsou z výzkumného projektu Statistical evaluation of PV system performance and failure data among different climate zones. Všechny níže obsažené grafy a informace jsou ovlivněny množstvím získaných dat.

Ze studií/ informací o výkonu a spolehlivosti fotovoltaických elektráren vyplývá, že jeden specifický FV modul se nechová ve všech klimatických oblastech stejně. Jednou z možností rozdělení poruch je histogram (Obr. 23) zobrazující počty poruch jednotlivých částí FVE lišících se podle klimatické oblasti. Je však ovlivněn množstvím dostupných dat v jednotlivých oblastech. Nejméně dat je z oblasti D a E.

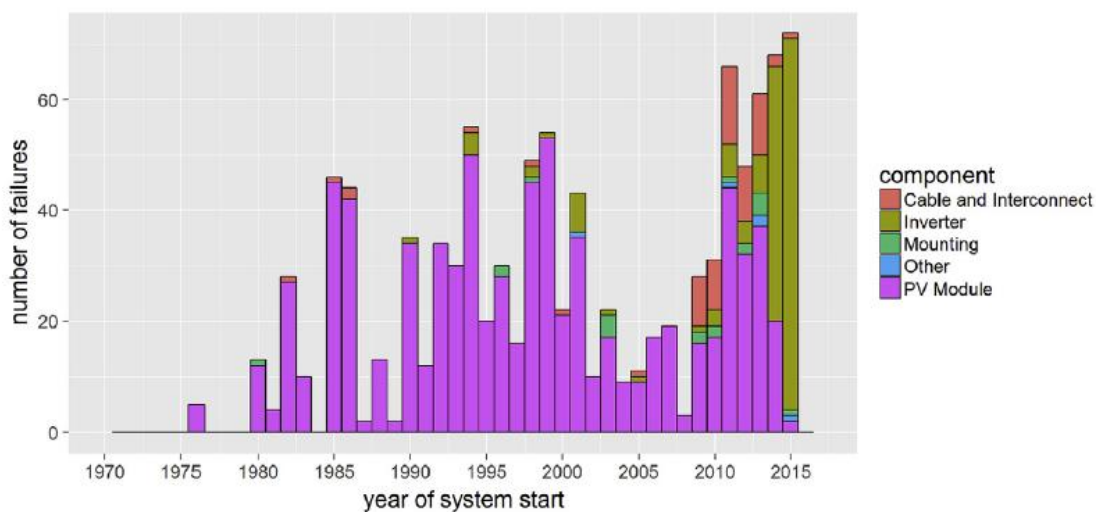


Obr. 23: Histogram počtu poruch zohledňující klimatické oblasti

- A ... tropické podnebí
- B ... suché podnebí
- C ... mírné podnebí
- D ... boreální podnebí
- E ... studené podnebí

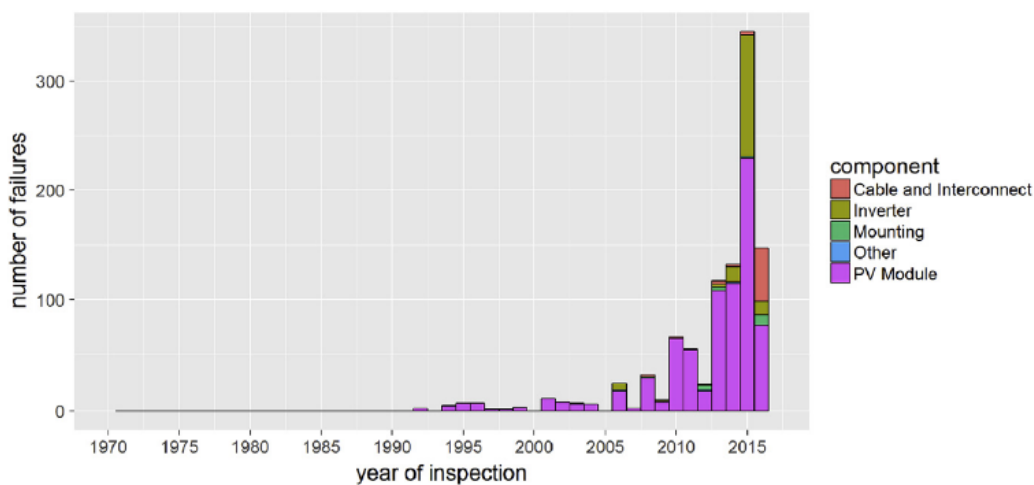
Je vidět, že největší počet poruch se objevuje na FV modulech. S hodně velkým rozestupem následují střídače, kabely a propojení. Nejméně poruch se pak objevuje v upevnění.

Dalším možným přehledem je histogram (Obr. 24) týkající se počtu poruch v závislosti na roku instalace.



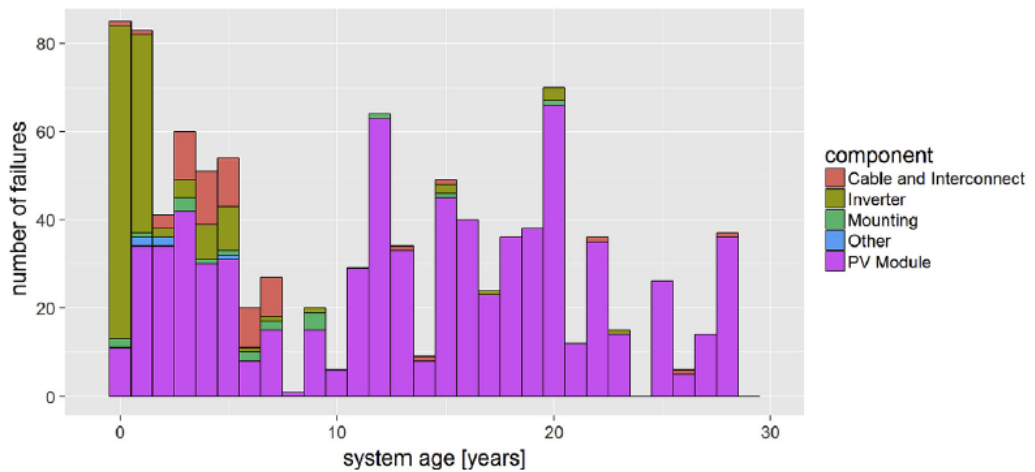
Obr. 24: Histogram počtu poruch v závislosti na roku instalace

Data zohledňují instalace probíhající od roku 1970 až do roku 2015. Opět se poruchy nejčastěji vyskytují u samotných FV modulů. V posledních pěti letech se však výrazně zvedla poruchovost střídačů. Také množství poruch na kabelech a spojích je vyšší, což může být způsobeno špatným umístěním nebo nepoužitím chrániček. Data jsou zároveň ovlivněna rokem kontroly/revize, které ve větším množství probíhaly až od roku 2005 (Obr. 25).



Obr. 25: Počet poruch v závislosti na roku kontroly

Další možnou interpretací dat je histogram (Obr. 26) poruch v závislosti na stáří systému. Ten je výsledkem rozdílu mezi Obrázkem 25 a 26.

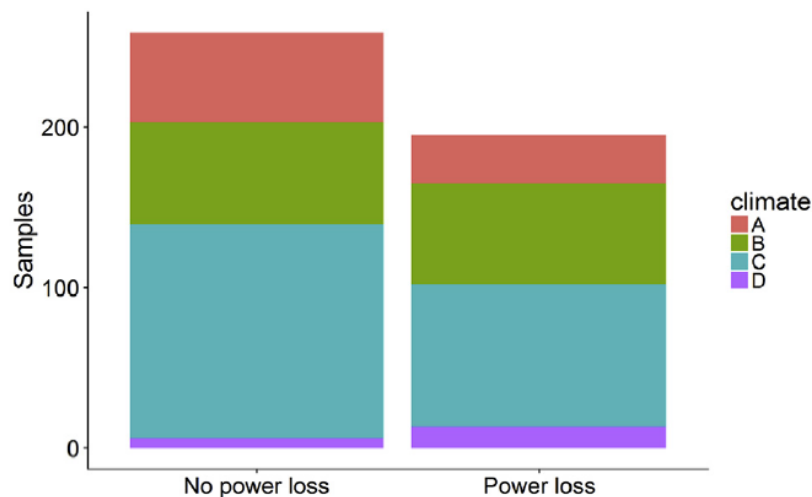


Obr. 26: Histogram počtu poruch v závislosti na stáří systému

Výsledné rozdělení je důkazem toho, že neexistuje větší odchylka u mladších nebo starších dat FV modulů.

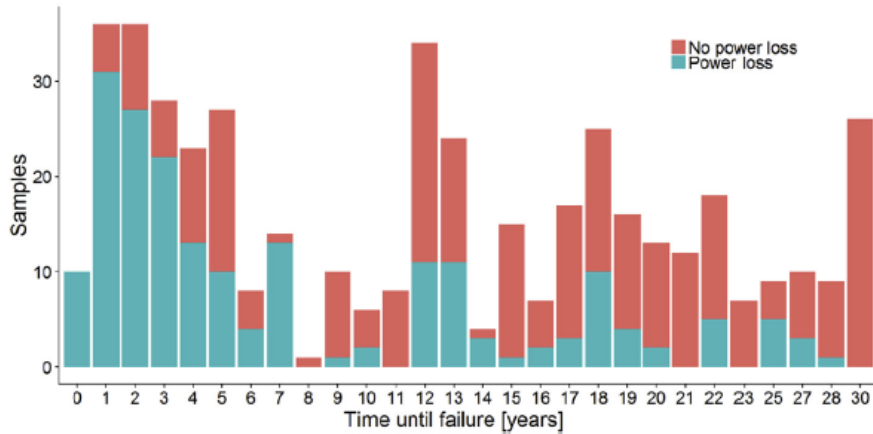
4.1.1 Vlivy na ztrátu výkonu

Poruchy byly zařazeny do získaných dat ať se jednalo o poruchu vedoucí ke ztrátě výkonu, nebo ne. Jedním z možných zobrazení (Obr. 27) je závislost poruch (ne)mající vliv na výkon. Klimatická oblast E byla vyřazena pro nedostatek údajů.



Obr. 27: Počet poruch v závislosti vlivu na výkon

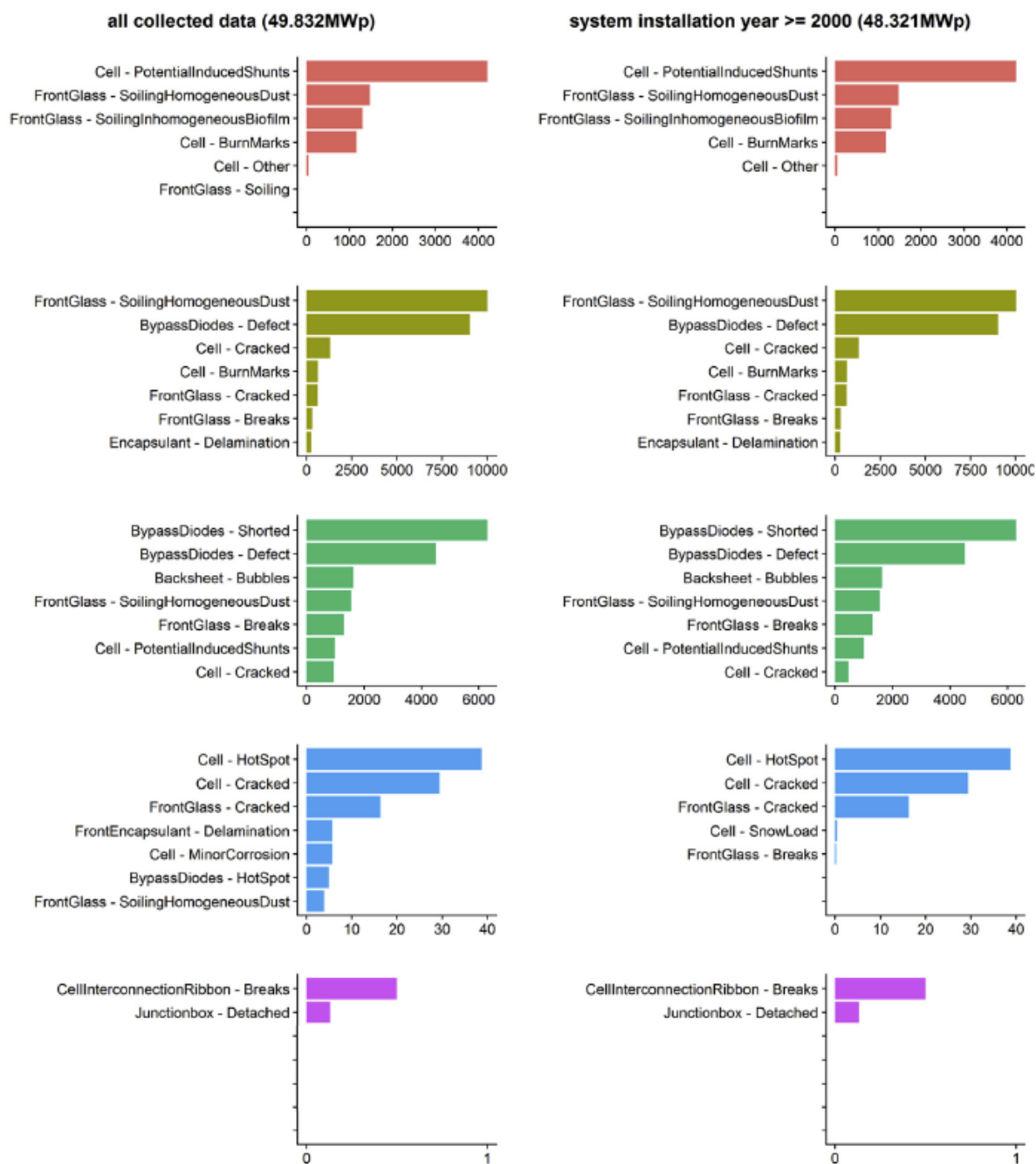
Druhým možným zobrazením je závislost na čase do poruchy (Obr. 28). Histogram popisuje čas mezi datem instalace a oznámením o poruše. Většinou nejsou informace o čase uběhlém mezi výskytem poruchy a detekcí. Pokud je ale pravidelně systém kontrolován, nebo nějaké typy poruch způsobí okamžité vypnutí systému, je čas mezi výskytem a detekcí známý.



Obr. 28: Histogram počtu poruch v závislosti na čase do poruchy podle vlivu na výkon

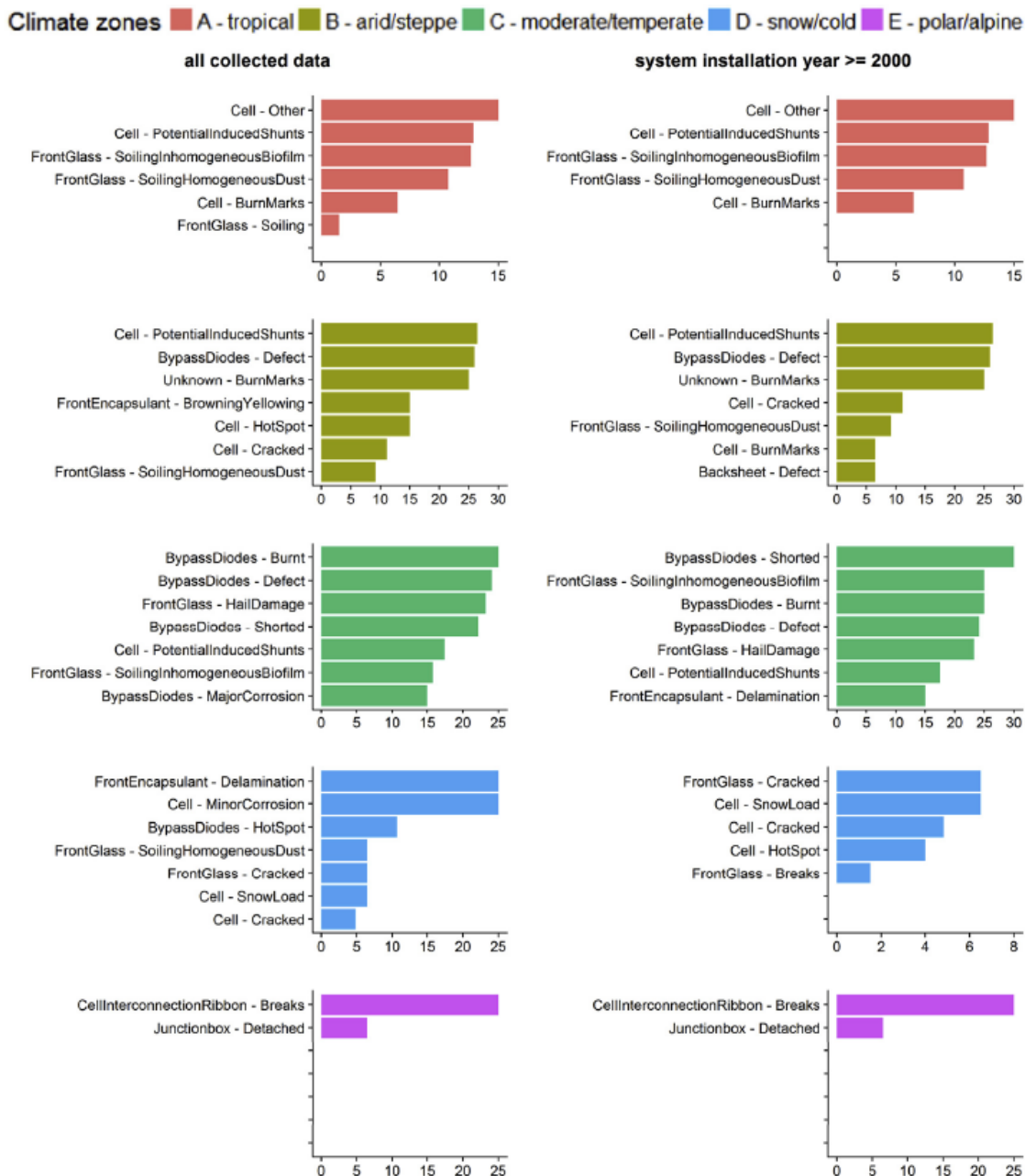
Ztráta výkonu závisí na typu poruchy. Jednotlivé poruchy s nejvyšší ztrátou výkonu jsou ovlivněny i oblastmi ve kterých jsou systémy nainstalovány. Následující výčet diagramů (Obr. 29) zobrazuje nejčastější poruchy (svislá osa) a velikost ztrátového výkonu [kW_p] (vodorovná osa) v jednotlivých klimatických oblastech. Výčet diagramů je ještě rozdělen na dva sloupce, kde rozdíl je mezi množstvím použitých dat. V levém sloupci jsou zohledněna všechna nasbíraná data a v pravém pak data od roku 2000. Nejvyšší ztrátový výkon mají poruchy spojené s FV článkem, předním sklem FV modulu a bypassovými diodami podle dané oblasti.

Climate zones **A** - tropical **B** - arid/steppe **C** - moderate/temperate **D** - snow/cold **E** - polar/alpine



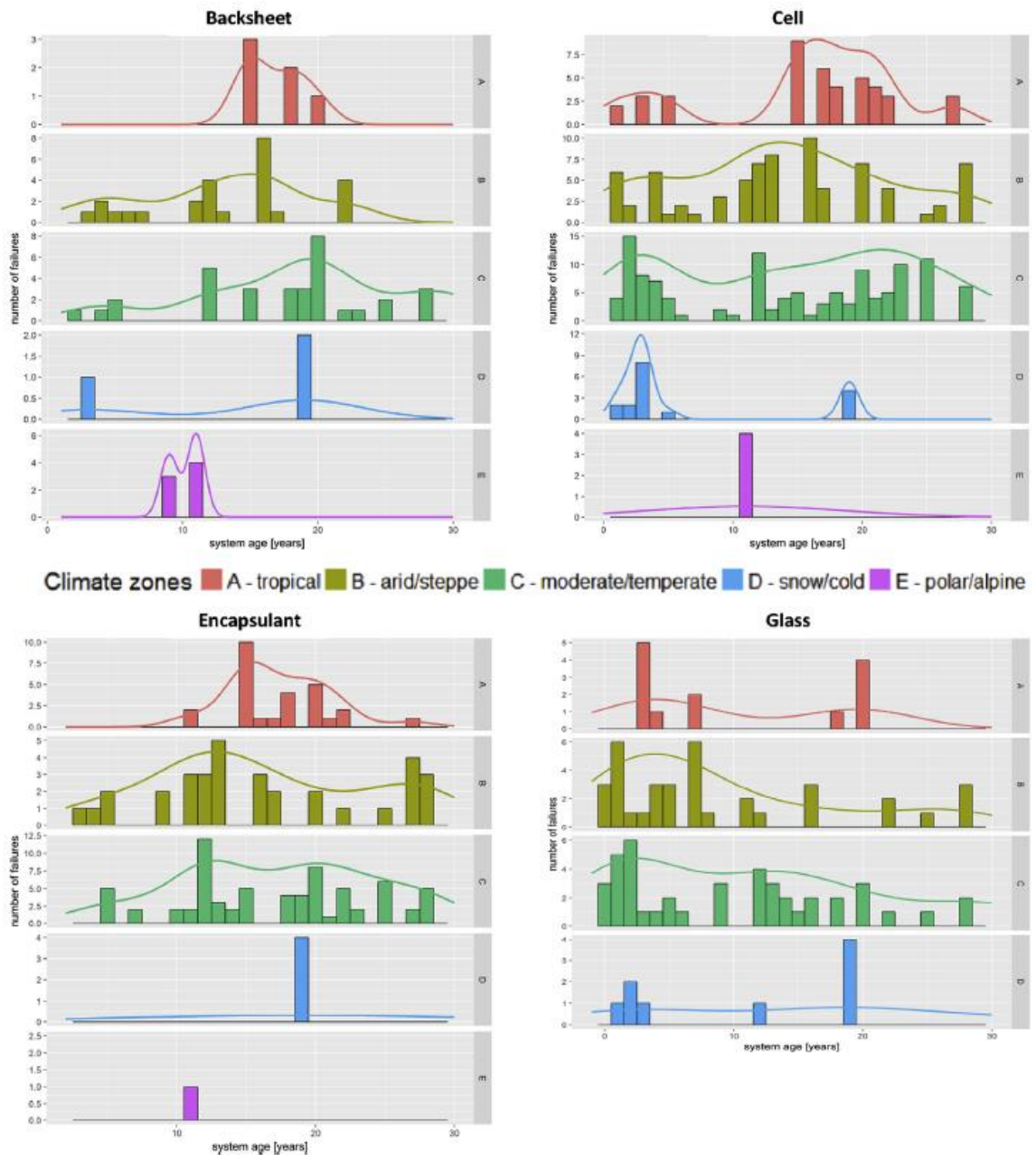
Obr. 29: Typy poruch s nejvyšší ztrátou výkonu v jednotlivých klimatických oblastech

Následující výčet diagramů (Obr. 30) popisuje nejvyšší průměrnou rychlost degradace jednotlivých poruch, opět rozdělením do jednotlivých klimatických oblastí. Vodorovná osa je v procentech pro porovnání mezi jednotlivými diagramy, svislá osa pak obsahuje výčet poruch. Degradace se nejvíce týká převážně FV článku a předního skla.



Obr. 30: Nejvyšší průměrné rychlosti degradace dle poruch v jednotlivých klimatických oblastech

Poslední výčet (Obr. 31) je složen z diagramů popisujících jednotlivé poruchy FV modulu v závislosti na stáří systému. Opět jsou jednotlivé klimatické oblasti barevně odděleny. Jedná se o poruchu zadní strany (vlevo nahoře), poruchu FV článku (vpravo nahoře), poruchu obalu (vlevo dole) a poruchu skla (vpravo dole).



Obr. 31: Analýza získaných dat o poruchách „zadní strany“ (vlevo nahoře), „FV článku“ (vpravo nahoře), „obalu“ (vlevo dole) a „skla“ (vpravo dole) v závislosti na stáří systému

Z výše uvedených statistik vyplývá, že fungování FV systému záleží na klimatické oblasti. Zároveň jsou data ovlivněna rokem instalace a kontroly (ne každý provádí kontrolu pravidelně a řeší problémy okamžitě). Pravidelná kontrola může pomoci zjistit poruchu v raném stádiu a co nejdříve ji vyřešit. Nejvíce opakovanými poruchami s největším dopadem na FVE jsou poruchy FV modulů (podrobně viz 1. Vady a poruchy vyskytující se na FV modulech) a pak střídače.

V rámci této bakalářské práce bude docházet ke sběru určitých dat i na Fakultě elektrotechnické, konkrétně jde o izolační odpor modulů. Naměřená data budou následně moci sloužit pro vyhodnocení, určení budoucího stavu a kontrolu bezpečného provozu modulů. Obdobná data se budou pak zpracovávat i v následujících letech, kdy by mělo dojít k rozšíření množiny sbíraných dat (parametrů). Všechna data, ať už současně měřený izolační odpor nebo v budoucny další parametry, budou získávána z jednotlivých modulů, případně pole, nacházejících se na Fakultě elektrotechnické (upevněné na konstrukci na střeše).

5 Monitoring

Monitoring fotovoltaické elektrárny je důležitý proces, který umožňuje sledovat výkon a provoz systému s cílem maximalizovat výnosy a optimalizovat jeho fungování. Předpoklad bezporuchovosti systému se často neshoduje s realitou. V průběhu provozu se objevují poruchy/závady zmíněné v předchozích kapitolách. To vše se může časem projevit v lepším případě jen na výkonu elektrárny (nižší výkon), v horším případě pak můžou poruchy přejít až do bezpečnostních rizik (vznik požáru, úraz elektrickým proudem apod.). Z těchto důvodů je vhodné fotovoltaické systémy sledovat (monitorovat), na základě dat analyzovat možné poruchy a provádět případné úpravy, ať už na úrovni systému (výměna jednotlivých komponent, upgrade) nebo na úrovni softwaru a řízení (regulace). Monitoring je tak klíčovým nástrojem pro zajištění optimálního výkonu a dlouhodobé funkčnosti fotovoltaického systému.

Měniče jsou primárním zdrojem informací. Nejčastěji jde o výkon fotovoltaického pole, napětí systému, množství energie odebrané ze sítě a odeslané do sítě, vlastní spotřebu objektu, případně o akumulaci energie a s tím je spojen výkon a kapacita baterií.

Klíčové aspekty monitorování fotovoltaické elektrárny:

- ❖ výkonové monitorování
 - sledování výroby elektrické energie FVE
- ❖ optimalizace výkonu
 - informace o efektivitě systému, možnost optimalizace provozu a výkonu
- ❖ stav komponent
 - sledování stavu jednotlivých komponent FVE pro případnou identifikaci poruch
- ❖ analýza dat a reportování
 - shromažďování dat pro dlouhodobou analýzu
- ❖ diagnostika a opravy
 - identifikace problémů v reálném čase, rychlá reakce na poruchy či ztrátu výkonu
- ❖ finanční analýza
 - výpočet výnosnosti, sledování návratnosti investice, provozních nákladů
- ❖ bezpečnost a ochrana
 - bezpečnost a ochrana FVE proti krádeži a dalším rizikům

Kromě toho může moderní monitorovací software nabízet různé funkce, jako jsou notifikace o událostech, vzdálený přístup a možnosti vzdáleného ovládání systému. Takovéto funkce umožňují majitelům elektráren efektivněji spravovat své investice a maximalizovat výnosy.

5.1 Parametry pro sledování a vyhodnocování

5.1.1 Výkon fotovoltaické elektrárny

Jde o hlavní a nejčastěji probíraný parametr pro sledování a vyhodnocování. Výkon poskytuje informaci o množství vyrobené energie v reálném čase (případně i v čase minulém). Množství vyrobené energie je nejvíce závislé na intenzitě záření, teplotě a zastínění modulu. I přes takovéto závislosti, které mohou v určitých případech ovlivnit výsledný výkon značně, lze ze zaznamenaných hodnot na základě ostatních parametrů (intenzita záření, teplota, zastínění...) určit případný problém.

5.1.2 Napětí systému

Zobrazují se dvě odlišné hodnoty – stejnosměrné napětí a střídavé napětí. DC napětí (stejnosměrné) je měřeno před vstupem do střídače. Jde o výstupní hodnotu napětí fotovoltaických modulů. Tato hodnota je opět závislá na okolích vlivech stejně tak jako výsledný výkon. AC napětí (střídavé) je měřeno za střídačem. Z výstupu střídače pak pokračujeme do rozvaděče, přes elektroměr do distribuční sítě. Jedná se tak o napěťovou hladinu, do které je vše připojeno.

5.1.3 Distribuční síť – odběr/výkup

Systémy bývají většinou připojeny do distribuční sítě, přičemž síť je v pozici dodavatele nebo odběratele. Pokud fotovoltaický systém vyrábí energii a v domě existuje okamžitá spotřeba, jde veškerá energie na okamžitou spotřebu, případně je zároveň odebírána energie ze sítě (pokud je nedostatečné množství energie z fotovoltaiky). Z pohledu majitele objektu energii ze sítě odebírám (nakupuji). Na základě těchto dat lze přizpůsobit odběr spotřebě – větší spotřeba v moment maximální výroby fotovoltaické elektrárny. Pokud je okamžitá spotřeba nižší než dodávaný výkon, probíhá výkup energie do distribuční sítě (prodej energie pryč), další možností je potom bateriové úložiště.

5.1.4 Akumulace energie

Bateriové úložiště je systém umožňující ukládání přebytečné energie pro pozdější využití. Uložená energie pak může být užitečná v době, kdy je spotřeba energie vyšší než produkce solárními moduly. Domácnosti/podniky tak mohou být více flexibilní a energeticky nezávislé, umožňuje to úspory za energie z veřejné sítě. Důležitými parametry pro informaci stavu úložiště je kapacita a výkon. Kapacita baterie je uváděna v Ah, jde o to, jaký proud je baterie schopna dodávat po jakou dobu. Watt hodiny pak udávají, jaký výkon dokáže baterie dodat po jakou dobu.

Dalšími parametry pak může být životnost baterií, účinnost, bezpečnost. Životnost baterií je určena počtem cyklů nabíjení a vybíjení, které mohou baterie provést před tím, než začnou ztrácet výkon. Účinnost bateriového úložiště ovlivňuje, kolik energie se ztrácí během procesu nabíjení a vybíjení. Bateriová úložiště by měla být navržena tak, aby minimalizovala riziko přehřátí, vznícení nebo výbuchu.

5.1.5 Další parametry

Vedle základních parametrů sledovaných v rámci elektrárny, je možné doplnit systém o různé senzory (pyranometr, teplotní čidlo, meteorologická stanice ...) či další komponenty (optimizery ...). Senzory umožňují přesnější vyhodnocení funkčnosti systému. Při vyhodnocování dat dochází k porovnání s daty ze dne, kdy byly podmínky (intenzita záření, teplota ...) totožné, nebo velmi podobné. Na základě porovnání těchto dat lze následně vyhodnotit stav elektrárny. Pokud je systém doplněn o další komponenty, je možné získávat údaje nejen o celé elektrárně, ale i z jednotlivých částí. Pokud pak dojde k problému v nějaké části elektrárny, díky podrobnějším datům lze místo/zdroj problému identifikovat přesněji. Společně s předchozími daty tak můžeme stanovit o kolik se zhoršila výroba, a případně určit přímo příčinu zhoršení.

Je možné následně porovnat množství aktuálně vyrobené energie s množstvím vyrobeným jiný den, kdy byly podmínky totožné.

5.2 Ověřování vybraných poruch FV systému

Primárním zdrojem informací, jak již bylo zmíněno na začátku kapitoly, jsou měniče. Poskytují základní informace o elektrárně. Izolační odpor je podstatným parametrem v moment, kdy se bavíme o bezpečnosti. Vzhledem k tomu, že daný parametr není často měřen, v případě problému jde o vybranou poruchu FV systému a je potřeba se na ni více zaměřit.

6 Návrh systému pro automatizované ověřování izolačního odporu

V této práci bude demonstrováno kontinuální měření izolačního odporu, obdobně je pak možno měřit i další parametry. Naměřená data je potřebné archivovat a ukládat pro další zpracování. Zde se už prolíná technologie FVE s informačními technologiemi a v budoucnu i s automatizovanými expertními systémy.

6.1 Izolační odpor

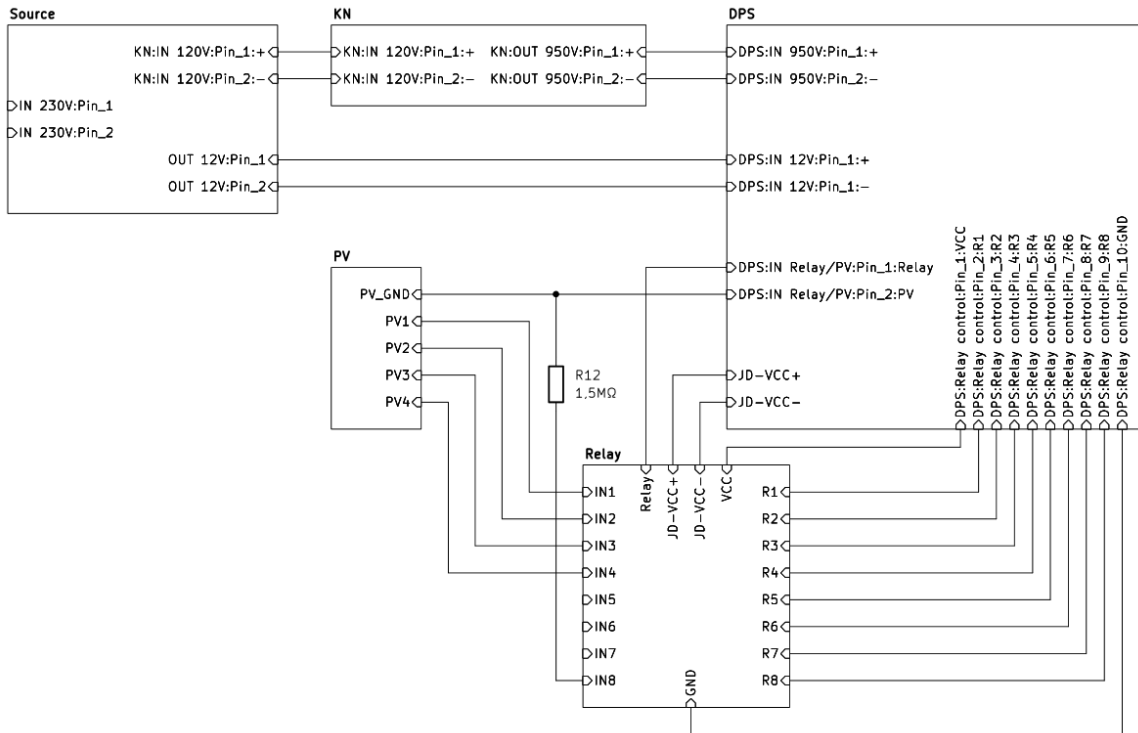
Izolační odpor fotovoltaického modulu je míra, která udává, jak dobře je izolován vnitřní elektrický okruh modulu od vnějších prvků. Vyšší izolační odpor znamená lepší izolaci a nižší pravděpodobnost elektrického spojení mezi živou částí a vnějším prostředím. Je-li izolační odpor modulu příliš nízký, může docházet k úniku elektrického proudu a tím i k možnému ohrožení provozní bezpečnosti a účinnosti modulu.

Izolační odpor je důležitým parametrem, zejména v situacích, kdy jsou fotovoltaické moduly vystaveny vlhkosti nebo extrémním teplotám. To může způsobit zhoršení elektrických vlastností, případně i zkratky.

Měření se řídí normou ČSN EN IEC 61215-2. Pro měření se využívá vysokonapěťového zdroje s proudovým omezením a přístroje pro měření odporu (izolačního). Proces měření izolačního odporu zahrnuje aplikaci určitého napětí. Úroveň napěťového namáhání modulu je určena maximálním systémovým napětím modulu, třídou modulu a zda jsou či nejsou přítomny lepené spoje. Izolační odpor je měřen mezi rámem modulu a výstupními svorkami.

6.2 Blokové schéma systému

Mnou navržený hardware pro automatizované ověřování izolačního odporu se skládá z několika částí.



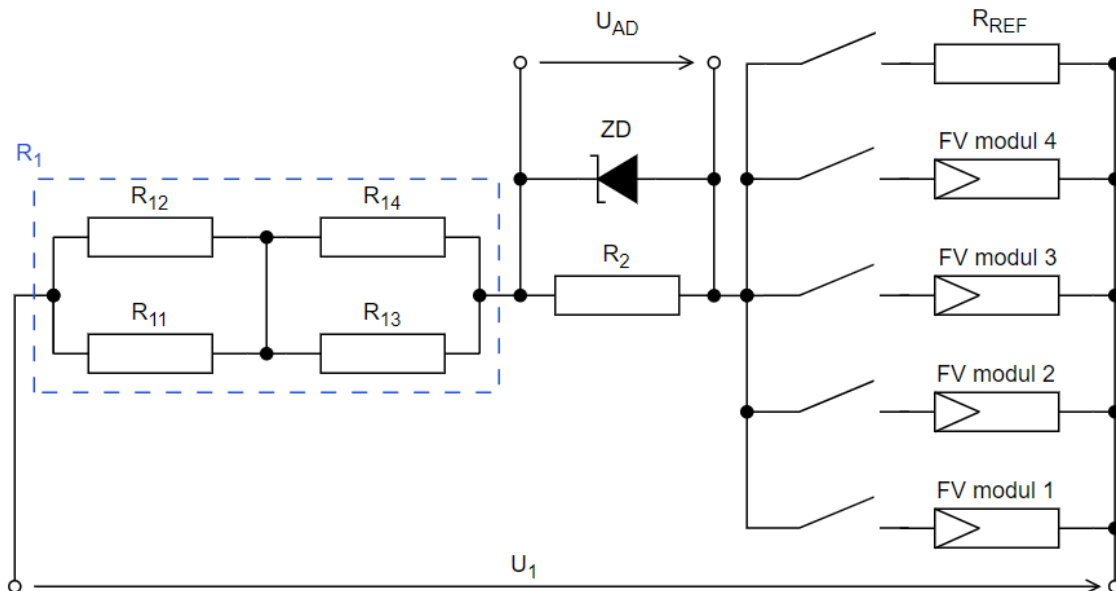
Obr. 32: Blokové schéma automatizovaného systému

1. Source ... Napájení
2. KN ... Kaskádový násobič napětí
3. DPS ... Měřicí obvod, A/D převodník, převodník logických úrovní, Raspberry Pi Pico W
4. Relay ... 2x modul relé 4 kanály
5. PV ... Fotovoltaické moduly

ADC převodník slouží k převodu spojitého signálu na signál diskretní pro umožnění zpracování analogového signálu na PC. Převodník logických úrovní využijeme pro snížení napěťové hodnoty signálu z 5 V na 3,3 V z důvodu přijímání signálu Raspberry Pi Pico W. Raspberry Pi Pico W je jednočipový počítač postavený na RP2040 s bezdrátovým rozhraním. Jeho úkolem je přijímat a zpracovávat signál z měřicího obvodu, následně provést výpočty, a nakonec bezdrátově odeslat data.

6.3 Měřicí obvod

Měřicí obvod je složen z odporů, programovatelných relé a samotných fotovoltaických modulů (v případě kalibrace nahrazení rezistory o známé hodnotě odporu).



Obr. 33: Schéma měřicího obvodu

Parametry měřicího obvodu:

$U_1 = 950 \text{ V}$	Napětí na vstupu měřicího obvodu
$R_{11} = R_{12} = R_{13} = R_{14} = 470 \text{ k}\Omega$	Velikost odporu děliče
$R_2 = 1800 \text{ }\Omega$	Velikost odporu pro měření
$R_{REF} = 1,5 \text{ M}\Omega$	Velikost referenčního odporu

Měření probíhá na základě úbytku napětí na odporu R_2 . Čím větší je odpor FV modulu (v případě kalibrace rezistoru), tím menší je úbytek napětí na rezistoru R_2 . Napětí je převedeno AD převodníkem na bezrozměrné číslo a následně zpět na hodnotu udávanou ve voltech.

Práce navazuje na bakalářskou práci [6], ve které byl izolační odpor spočítán z naměřeného úbytku napětí na odporovém děliči. Úbytek napětí by měřen pomocí multimetru a data byla zaznamenávána na flash disk a následně zpracována v počítači. Měření nebylo plně automatizováno.

6.4 Kalibrace

Izolační odpor je určován na základě předchozí kalibrace. V rámci kalibrace probíhá měření známých odporů při různém vstupním napětí. Cílem je tak zamezit vzniku chyb, které se mohou objevit z důvodu kolísání napětí v síti.

V rámci kalibrace proběhne proměření rezistorů o známé hodnotě, které jsou připojeny k jednotlivým relé (výjimkou je relé 8, kde je trvale připojen referenční rezistor). Rezistory je vhodné volit s takovým odporem, aby se dal proměřit co největší rozsah čili od jednotek k Ω po jednotky až desítky G Ω . Po připojení přípravku (hardwaru) ke zdroji s proměnným napětím a zapnutím obou vypínačů je možné započít kalibrační měření spuštěním programu v počítači (nutné spojení datovým kabelem s Raspberry Pi Pico W) a dle informací na terminálu následně měnit velikost napětí na zdroji. Napětí je potřeba měnit v rozsahu od 200 V do 252 V s krokem 2 V. Po odměření a zapsání poslední hodnoty stačí program zastavit a stáhnout textový soubor s hodnotami. Hodnoty se do textového souboru zapisují po řádcích ve tvaru:

Název	Jednotky	Popis
Relay_x	-	x je číslo relé na kterém je hodnota naměřena
Power	V	Velikost napětí, mělo by být shodné s napětím nastaveným na zdroji
Avg	-	Průměrná naměřená hodnota, za AD převodníkem
UAD	V	Velikost napětí po převedení z bezrozměrného čísla

Z těchto dat je následně potřeba vytvořit jednotlivé soubory pro určení síťového napětí a interpolaci v budoucím automatizovaném měření.

Prvním typem souboru je textový soubor s názvem „R_ref“ do kterého je potřeba z výše získaných dat vybrat a zapsat pokaždé na nový řádek velikosti napětí UAD [V] jdoucí vzestupně podle síťového napětí. Pod tyto hodnoty je pak potřeba doplnit i velikosti jednotlivých napětí (opět vzestupně). Výsledný text bude vypadat obdobně jako text na Obr. 34.

Druhým typem souboru je opět soubor textový, jde však o 27 souborů se stejným formátem. Soubory budou uloženy s názvy ve tvaru „Power_x“, kde x je velikost síťového napětí. Soubory budou obsahovat informace o velikostech napětí naměřených na jednotlivých rezistorech o různé velikosti. Formát je podobný předchozímu, jen nejdříve zapisujeme velikosti napětí UAD vzestupně a poté velikosti použitých rezistorů sestupně. Výsledný text bude vypadat obdobně jako text na Obr. 35.

```

0.3185048
.
.
0.3895102
200
.
.
.
252

```

Obr. 35: Příklad zápisu souboru R_ref

```

0.000837148
.
.
1.322568
1000000
.
.
.
0

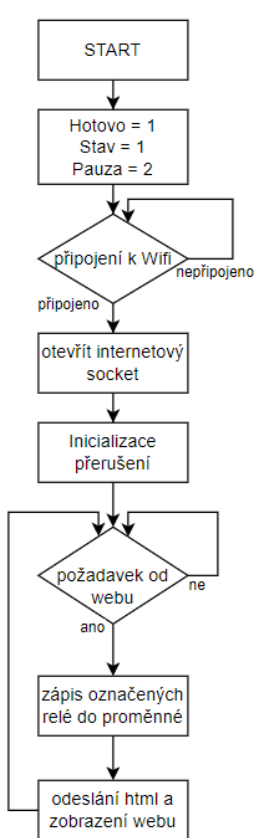
```

Obr. 34: Příklad zápisu souboru Power_x

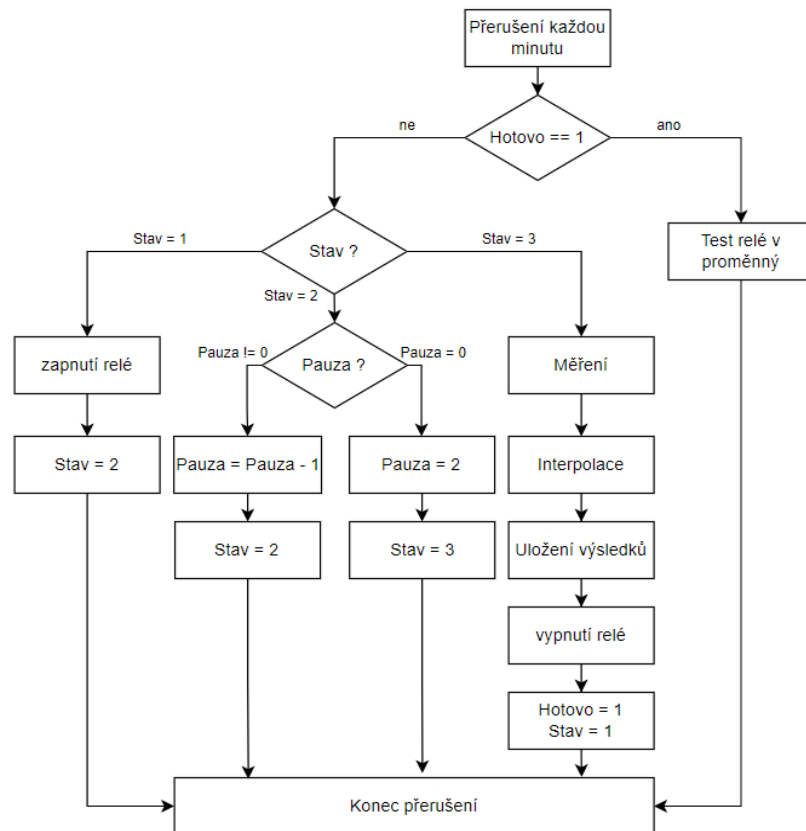
Soubor R_ref je při automatizovaném měření využit pro ověření velikosti síťového napětí na základě předem naměřených napětí UAD [V] na referenčním rezistoru. Ostatní soubory jsou využity při interpolaci (více níže).

6.5 Určení izolačního odporu

Pro automatizované měření je potřeba do Raspberry Pi Pico W nahrát kód, který slouží pro samotné měření, vyhodnocení a odeslání dat. Struktura kódu je popsána ve vývojovém diagramu (Obr. 36 a Obr. 37).



Obr. 36: Vývojový diagram hlavní smyčky



Obr. 37: Vývojový diagram přerušení

Měření probíhá na základě předem zvolených relé, které budou měřena. Nejprve je při vlastním měření potřeba zjistit s jakým síťovým napětím pracujeme. K tomu slouží referenční odpor, který je proměřen a porovnán podle již zmíněného souboru R_ref. Po získání hodnoty síťového napětí pokračujeme již v měření samotných FV modulů. FV modul je vždy 2 minuty napětově namáhán (podle normy ČSN EN IEC 61215-2) než dojde k odměření hodnoty převodníkem. Relé je poté vypnuto a dochází k sepnutí dalšího relé podle požadavku. Mezi odměřením a vypnutím relé je na základě příslušného souboru Power_x určeného dle síťového napětí provedena lineární interpolace, a tudíž určení výsledného izolačního odporu. Jedním z možných zobrazení naměřených hodnot je webová stránka (Obr. 38), na které lze zároveň volit proměřovaná relé. Výsledky jsou pravidelně ukládány do paměti a v případě požadavku webu dojde k jejich vypsání na stránku.

Automatizované ověřování izolačního odporu

Bakalářská práce

Zařízení bude nadále proměřovat následující relé:

- Relé 1
- Relé 2
- Relé 3
- Relé 4
- Relé 5
- Relé 6
- Relé 7

Výsledky posledního měření: Izolační odpor [MΩ]

Čas	Relé 1	Relé 2	Relé 3	Relé 4	Relé 5	Relé 6	Relé 7	Reference
	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-

! neměřeno

Obr. 38: Zobrazení na webové stránce

Druhou možností, jak naměřené hodnoty vypsát je do Grafany, což je open-source platforma s účelem vizualizace a monitorování dat. Tato metoda bude v budoucnu upřednostňována, protože poskytuje možnost analýzy dat.

7 Měření

Pro měření byly použity čtyři moduly od výrobce Canadian Solar, model CS5A-185M. Moduly jsou umístěny na střeše Fakulty elektrotechnické na konstrukci K2 D - Dome (Obr. 39). Přístroj pro měření je umístěn v laboratoři (Obr. 40) a spojení pro měření je zajištěno 5žilovým kabelem. Čtyři jednotlivé vodiče slouží pro připojení výstupní svorky FV modulů a poslední vodič propojuje všechny rámy. Pro získání naměřených dat je potřeba být v blízkosti měřicího přístroje a znát IP adresu na které jsou data k zobrazení.



Obr. 39: Moduly na střeše Fakulty elektrotechnické



Obr. 40: Měřicí přístroj

8 Závěr

Tato práce se zabývá závadami a poruchami fotovoltaických modulů a celých systémů.

V první části práce jsou popsány nejčastější poruchy a závady objevující se v rámci instalací. Poruchy se nejvíce vyskytují na jednotlivých modulech. V rámci celých systémů dochází pak k poruchám méně. Nejčastější poruchy jsou detailněji popsány z hlediska příčin a důsledků na chod FV systém. Přidány jsou i příslušné obrázky pro ujasnění vzhledu poruchy, nebo jejich důsledků.

Další část práce je zaměřena na statistiky a informace o jejich kvantitě. Dat je i za poslední dobu kdy se množství instalací zvyšuje, stále málo. Vzhledem k nedostatku těchto údajů a informací je potřeba do budoucna vylepšit sběr dat, ideálně ho automatizovat, a následně i automaticky vyhodnocovat.

Z tohoto důvodu je poslední část práce zaměřena na automatizované měření vybrané poruchy, tedy změny izolačního odporu. V rámci této části práce jsem provedla návrh měřicího systému pro izolační odpor. Na základě návrhu došlo na realizaci hardwaru a následovala tvorba softwaru. Software je nedílnou součástí měřicího přístroje, jelikož jde o automatizované měření. Výsledkem je webová stránka, která bude zobrazovat naměřené hodnoty izolačního odporu.

Z naměřených a následně uložených dat je dále možné vyhodnotit bezpečnost systému a predikovat budoucí stav čili jak dlouho by mohly být ještě moduly v provozu, než dojde ke vzniku závažnému problému. Vyhodnocení výsledků bude součástí další práce. Naopak součástí práce je Základní metodika pro sběr dat obsahující popis základních poruch a jejich důsledků na systém, doplněna o možnosti kontrol.

Na tuto práci lze v budoucích letech navázat návrhem a realizací systému pro další vybrané poruchy ať už jde o pokles výkonu, vliv změny sériového/paralelního odporu a jiné. Druhou možností, jak navázat na tuto práci je vyhodnocování získaných dat. Naměřená a uložená data mohou ukrývat mnoho informací o daném systému ať už se jedná o současný stav, stav minulý nebo v ideálním případě stav budoucí. Hodnoty získávané v reálném čase mohou pomoci optimalizovat fungování celého systému a zároveň predikovat budoucí stav systému.

Použitá literatura

- [1] SCHRÖPFEROVÁ, Lenka. *Ekonomické důsledky časového vývoje vad FVE* [online]. 2017 [cit. 2023-10-24]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/69516>. Bakalářská práce. Fakulta elektrotechnická ČVUT v Praze. Vedoucí práce Pavel Hrzina.
- [2] SCHRÖPFEROVÁ, Lenka. *Predikce chování fotovoltaických systémů na konci jejich životnosti* [online]. 2020 [cit. 2023-10-24]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/90127>. Diplomová práce. Fakulta elektrotechnická ČVUT v Praze. Vedoucí práce Pavel Hrzina.
- [3] *Review of Failures of Photovoltaic Modules Final* [online]. International Energy Agency, 2014 [cit. 2023-10-24]. ISBN 978-3-906042-16-9. Dostupné z: https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/01/IEA-PVPS_T13-01_2014_Review_of_Failures_of_Photovoltaic_Modules_Final.pdf
- [4] *Statistical evaluation of PV system performance and failure data among different climate zones* [online]. 2019 [cit. 2023-10-24]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148119303003>
- [5] *Assessment of Photovoltaic Module Failures in the Field* [online]. International Energy Agency, 2017 [cit. 2023-10-24]. ISBN 978-3-906042-54-1. Dostupné z: https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2017/09/170515_IEA-PVPS-report_T13-09-2017_Internetversion_2.pdf
- [6] *Poruchy zadní strany PV Modulu* [online]. Praha, 2023 [cit. 2024-05-18]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/111573/F3-BP-2023-Kalousova-Tereza-Poruchy%20zadni%20strany%20PV%20modulu.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>. Bakalářská práce. Fakulta elektrotechnická ČVUT v Praze. Vedoucí práce Pavel Hrzina.
- [7] *Detekce vad u fotovoltaických panelů* [online]. 2018 [cit. 2023-10-24]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/18366-detekce-vad-u-fotovoltaickych-panelu>
- [8] *Pokles výkonu fotovoltaických elektráren v důsledku vysokonapětového stresu* [online]. 2015 [cit. 2023-10-24]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/12260-pokles-vykonu-fotovoltaickych-elektraren-v-dusledku-vysokonapetoveho-stresu>
- [9] ČSN EN 62446-1+A1 (36 4623) *Fotovoltaické (PV) systémy - Požadavky na zkoušení, dokumentaci a údržbu. Část 1: Systémy spojené s rozvodnou sítí - Dokumentace, zkoušky při uvádění do provozu a kontrola*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2023.
- [10] ČSN EN IEC 61215-2 ed. 2 (36 4631) *Zemské fotovoltaické (PV) systémy – Posouzení způsobilosti konstrukce a schválení typu. Část 2: Zkušební postupy*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2021.
- [11] *Analytical Monitoring of Grid-connected Photovoltaic Systems* [online]. International Energy Agency, 2014 [cit. 2024-05-12]. ISBN 978-3-906042-18-3. Dostupné z: https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/01/IEA-PVPS_T13-D2_3_Analytical_Monitoring_of_PV_Systems_Final.pdf

- [12] *The Use of Advanced Algorithms in PV Failure Monitoring* [online]. International Energy Agency, 2021 [cit. 2024-05-12]. ISBN 978-3-907281-07-9. Dostupné z: https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2021/10/Final-Report-IEA-PVPS-T13-19_2021_PV-Failure-Monitoring.pdf
- [13] *Review on Infrared and Electroluminescence Imaging for PV Field Applications* [online]. International Energy Agency, 2018 [cit. 2024-05-12]. ISBN 978-3-906042-53-4. Dostupné z: https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/01/Review_on_IR_and_EL_Imaging_for_PV_Field_Applications_by_Task_13.pdf
- [14] *ČSN 33 2000-7-712 ed. 2 (332000) Elektrické instalace nízkého napětí. Část 7-712: Zařízení jednoúčelová a ve zvláštních objektech – Fotovoltaické (PV) systémy*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.
- [15] *ČSN EN IEC 61215-1 ed. 2 (364631) Zemské fotovoltaické (PV) moduly – Posouzení způsobilosti a schválení typu. Část 1: Požadavky na zkoušení*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2021.

Přílohy

P1. Základní metodika pro sběr dat

P2. Blokové schéma, desky plošných spojů