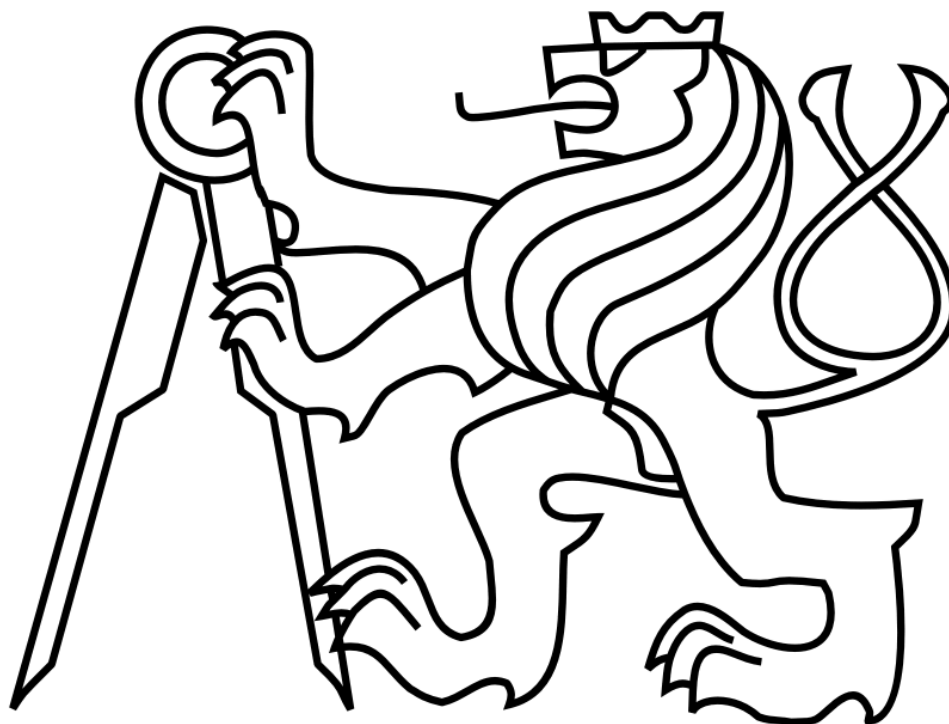


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE



Fakulta elektrotechnická
Katedra elektrotechnologie

Bakalářská práce
Komplexní diagnostika fotovoltaických systémů

Vypracoval: Martin Zimmermann

Vedoucí práce: Ing. Tomáš Finsterle

Praha 2015

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra elektrotechnologie

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Martin Zimmermann**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Obor: Aplikovaná elektrotechnika

Název tématu: **Komplexní diagnostika fotovoltaických systémů**

Pokyny pro vypracování:

1. Definujte parametry FVS, které se mění v průběhu života FVS a určete jejich teoretickou velikost na začátku života FVS.
2. Proveďte sérii experimentů na reálném FVS za účelem zjistit hodnoty parametrů FVS.
3. Vyhodnoťte výsledky a porovnání s teoretickými hodnotami, které mohly být na začátku života FVS při instalaci.
4. Vyhodnoťte důvody, které zapříčinily odklon od teoretické výtěžnosti FVS.

Seznam odborné literatury:

- [1] Gray, Jeffery L. The Physics of the Solar Cell. A. Luque a S. Hegedus. Handbook of Photovoltaic Science and Engineering. Chichester : John Wiley & Sons, Ltd., 2003, 3.
- [2] Taylor, N. (Ed.): Guidelines for PV Power Measurement in Industry, Italy: European Commission, Joint Research Centre, Institute for Energy. 2010-04. Cite 2011. ISBN: 978-92-79-15780-6.
- [3] Libra, Martin, Poulek, Vladislav. Solární energie, fotovoltaika – perspektivní trend současnosti i blízké budoucnosti. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2005. 122 s. ISBN 80-213-1335-8

Vedoucí: Ing. Tomáš Finsterle

Platnost zadání: do konce letního semestru 2015/2016

Ing. Karel Dušek, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 25. 3. 2015

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma komplexní diagnostika fotovoltaických systémů vypracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité zdroje, které jsem při psaní práce využil.

V Praze dne 13. 5. 2015

.....
Martin Zimmermann

Poděkování

Chtěl bych poděkovat především svému vedoucímu práce, kterým byl Tomáš Finsterle, za jeho ochotu poradit a pomoci a za odbornou pomoc, která mi byla poskytnuta při realizaci praktické části bakalářské práce. Dále bych chtěl velmi poděkovat Ing. Mileně Zimmermannové, která mi poskytla přístup k fotovoltaické elektrárně firmy Rovyna s.r.o a k historii výroby elektrárny.

V Praze dne 13. 5. 2015

Martin Zimmermann

Anotace

Předmětem této bakalářské práce je uvést základní typy fotovoltaických článků a jejich specifika. Provést rešerši závad vyskytujících se u fotovoltaických panelů, jejich možné příčiny a negativní důsledky na ostatní panely a v důsledku na celý fotovoltaický systém. Možnosti diagnostiky těchto závad s přihlédnutím na ekonomické i časové nároky a poté v praktické části je provedena diagnostika takového systému v terénu a diagnostika v laboratoři.

Annotation

The subject of this thesis is to introduce basic types of photovoltaic cells and their specifics. To research the faults occurring in photovoltaic panels, their possible causes and negative impacts on other panels and as a result the entire photovoltaic system. Possible diagnosis of these faults with regard to both economic and time requirements, then the practical part of the diagnosis of such a system in the field and laboratory.

Obsah

1. Úvod	8
2. Základní typy fotovoltaických článků	9
2.1 Krystalické články (c-Si)	9
2.1.1 Monokrystalické články	9
2.1.2 Polykrystalické články.....	10
2.2 Tenkovrstvé fotovoltaické články	11
2.2.1Fotovoltaické články CIGS	11
2.2.2 Amorfnní křemíkové články (a-Si).....	12
2.3 Odlišnost amorfnní technologie	12
2.4.2 Výhody modulů z amorfnního křemíku	13
3. Stárnutí FV panelů	14
3.1 Delaminace FV panelu	14
3.2 Proražení bypassové diody	14
3.3 Horká místa	15
3.4 Šnečí cestičky (Snailtrails)	16
3.5 Potential induced degradation (PID)	17
4. Diagnostické metody	18
4.1 Termografie	18
4.2 LBIC (LightBeamInducedCurrent)	18
4.3 Elektroluminiscence	18
4.4 Fotoluminiscence.....	20
4.5. Sluneční simulátor s testerem.....	21
4.5.1 Typy solárních simulátorů.....	21
5. Parametry FVS, které se mění v průběhu života FVS	23
5.1 Metodika výpočtu celkové produkce elektrické energie FVS.....	23
5.2 Odhad výroby	23
5. 3 Elektrické parametry fotovoltaických panelů.....	25
5.3.1 Parametry odečtené z V – A charakteristiky	25
6. Praktická část.....	29
6.1 Technické údaje FVE	29
6.2 Měření termokamerou	29
6.3 Měření V- A charakteristik.....	31
6.4 Porovnání teoretických hodnot se skutečnými	32
6.5 Vyhodnocení stavu elektrárny	33

6.6 Měření pomocí flash testeru PASAN	34
6.7 Měření elektroluminiscence	35
6. 7. 1 Tenkovrstvý amorfnní panel 80W	35
6. 7. 2 Tenkovrstvý amorfnní panel 95W	36
7. Závěr	38

1. Úvod

Solární energie patří mezi obnovitelné zdroje energie, její využití má minimální negativní dopady na životní prostředí a díky nízké ceně křemíku a stále se zdokonalující se technice jeho zpracování a výroby fotovoltaických článků, jde o nejrychleji se rozvíjející se typ alternativního zdroje energie.

V České republice jsou poměrně dobré podmínky pro využití energie slunečního záření, přestože množství sluneční energie v průběhu roku kolísá a největší množství sluneční energie dopadá v období, kdy spotřeba elektřiny je nejnižší. V současné době většina energie pochází z fosilních paliv - uhlí, ropy a zemního plynu. Jenže i když se fosilní paliva řadí mezi obnovitelné zdroje, obnova trvá přinejmenším několik tisíc let a stávající zásoby vystačí pouze na několik stovek let. Díky postupnému mizení fosilních paliv se hledají další využitelné zdroje. Jako dobrá alternativa třetího tisíciletí se počítalo s jadernou energií, ale právě ta se začala jevit kvůli rizikům jako neuspokojivé řešení a mezi hlavní zdroje, se kterými se bude ve 21. století počítat je jistě energie vydávaná slunečním zářením.

2. Základní typy fotovoltaických článků

Vývoj fotovoltaických článků probíhá již od poloviny 20. století. Za tuto dobu bylo vyzkoušeno mnoho typů konstrukcí a materiálů. Při vývoji se klade důraz na co nejvyšší účinnost a životnost FV článků, na co nejnižší výrobní náklady, ekologičnost a recyklaci.

Solární články na bázi krystalického křemíku dominují dnešnímu trhu podílem 85%. Křemík je nejedovatý a v elektronice dobře známý a vyzkoušený materiál. Po kyslíku je křemík druhým nejrozšířenějším prvkem na Zemi a tím snadno dostupný. Nevyskytuje se však v čisté formě, nýbrž se musí získávat z roztaveného křemenného písku při vysokých teplotách. V chemických procesech je křemík dále čištěn, až je dosaženo téměř 100 % čistoty. Ve fotovoltaice se jako základní materiál pro fotovoltaické články využívají především křemíkové odpady elektronického průmyslu. Různé firmy pracují na výrobě levnějšího křemíku, neboť samotný odpadní křemík již pro rychle se rozvíjející solární trh nestačí. Jakmile se započne se samostatnou výrobou křemíku pro solární technologie, fotovoltaický (FV) průmysl již nebude závislý na výrobě klasické elektroniky. Vysoce čistý křemík je možno různými způsoby zpracovat na monokrystalické nebo polykrystalické solární články. [1]

2.1 Krystalické články (c-Si)

2.1.1 Monokrystalické články

Protože právě polovodičové součástky jsou na bázi monokrystalického křemíku, šel vývoj fotovoltaiky nejprve tímto směrem. Fotovoltaické články z monokrystalického křemíku mají zpravidla sytě modré až černé zabarvení a obvykle mají čtvercové články seříznuté rohy, takže mají osmiúhelníkový tvar. Různé zbarvení je způsobeno použitím rozdílných antireflexních vrstev.

U monokrystalických článků je dobře viditelná síť kovových vodičů, které tvoří horní kontakt. Teoreticky mají tyto články účinnost 24 %, ale technologicky je reálné dosáhnout účinnosti fotovoltaických modulů v rozsahu 14 až 16 %. Jejich energetická návratnost (EPT - EnergyPaybackTime), což je vlastně doba, za kterou vyprodukují energii spotřebovanou při jejich výrobě, je cca 2,7 let.

Protože technologie výroby monokrystalického křemíku metodou zonální tavby je energeticky velmi náročná, hledaly se další možnosti, jak využít krystalického křemíku a přitom výrazně snížit náklady.

Řešením je výroba fotovoltaických článků na základě polykrystalického křemíku. [2]



Obr. 1. monokrystalický článek , podle lit. [3]

2.1.2 Polykrystalické články

Fotovoltaické články z polykrystalického křemíku jsou jasně modré a je u nich velice často zřejmá výrazná krystalická struktura. Polykrystalické solární články bývají čtvercové. Účinnost polykrystalických článků je sice nepatrně nižší, ale náklady na jejich výrobu jsou stále nižší, než na výrobu monokrystalických panelů, a proto jsou dnes prakticky nejčastěji instalovanými panely. Tento rozdíl se však v poslední době zmenšuje, případně zcela mizí. Z energetického pohledu se podařilo snížit ukazatel EPT na 2,2 roky. [4]



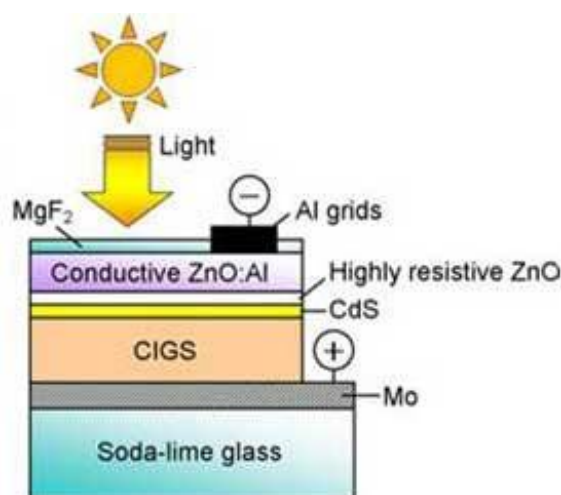
Obr. 2. polykrystalický článek zdroj, podle lit. [5]

2.2 Tenkovrstvé fotovoltaické články

2.2.1 Fotovoltaické články CIGS

CIGS je pevný kompozitní polovodičový materiál (typ p) složený z mědi (Copper), india (Indium), gallia (Gallium) a selenu (Selenium) s šířkou zakázaného pásnu od 1.0 do 1.7 eV. Odtud i název CIGS. Fotovoltaické CIGS články se nejběžněji vyrábí ve formě polykrystalické tenké vrstvy. Na rozdíl od křemíku, které světlo absorbuje až hluboko v objemu, u CIGS se až 95% veškerého dopadajícího záření zachytí již v prvním mikrometru materiálu pod povrchem. A protože strukturu CIGS článků lze nejen provozovat jako heteropřechod společně s dvojrivrstvou CdS jako n-polovodičem a s ZnO jako elektrodou (katoda), ale i jako komplexní heteropřechod pouze s CIGS polovodičem a přímo na něj nanesenou průhlednou ZnO₂ elektrodou, lze solární články vyrábět jako velmi tenké (jen několik mikrometrů).

Obě struktury pak bývají umístěny na podložce z molybdenem pokrytého skla, hliníku nebo nerezové oceli, která tvoří anodu. U takto provedených konstrukcí se již povedlo laboratorně dosáhnout účinnost přes 19%, i když první komerční produkty zatím dosahují „jen“ cca 12 až 14%. I to je však výborný výsledek s ohledem na světlou budoucnost této technologie. [6]



Obr. 3. Solární článek CIGS, podle lit. [6]

2.2.2 Amorfni křemíkové články (a-Si)

Amorfni křemík se pro účely slunečních elektráren využívá relativně krátkou dobu, přibližně od roku 1985. Technologie amorfniho křemíku je však známa mnohem déle a pro běžného smrtelníka je nejčastěji k vidění například v kalkulačkách na "solární pohon". Amorfni látky jsou látky v pevném skupenství, které nemají pravidelnou (krystalickou) strukturu. Přestože jsou amorfni látky pevné, lze je pokládat za kapaliny s velmi vysokou viskozitou. V přírodě vznikají např. při rychlém ochlazení taveniny, kdy částice nemají čas pro vytvoření krystalů. Mezi amorfni látky patří sklo, asfalt, vosk nebo pryskyřice. Při zahřívání postupně měknou, až do teploty, kdy se rozpustí. Jejich teplotu tání tudíž nelze přesně stanovit, ale lze je určit pomocí oblasti měknutí, což je teplotní interval mezi pevnou a kapalnou fází .[2]



Obr. 4. panel z amorfniho křemíku, podle [7]

2.3 Odlišnost amorfni technologie

Amorfni křemíkové panely nevznikají z jednotlivých článků, jako u krystalických metod, ale je tvořena souvislou vrstvou, která vzniká díky odlišnosti ve výrobě. Krystalický křemík se vyrábí ve vysokých pecích a poté jsou ingoty křemíku řezány do podoby článků. Moduly z amorfniho křemíku jsou vyráběny tak, že je ve vakuové komoře při teplotách kolem 200°C je na skleněnou tabuli deponována samotná vrstva amorfniho křemíku. Podkladový materiál nemusí být nutně pouze sklo, ale i plasty nebo kovy. Zatímco klasické články mají tloušťku cca 0,3 mm, amorfni křemík je nanášen do vrstev nepřesahujících 0,001 mm. Odtud označení "tenkovrstvá technologie". Výroba amorfni panelů je tedy levnější a méně materiálově i energeticky náročná oproti krystalickým článkům. Dnešní amorfni panely však oproti krystalickým panelům zaostávají v parametru účinnosti, kdy dosahují přibližně poloviční účinnosti. Účinnost však nic neříká o kvalitě technologie, účinností je dána pouze plošná rozloha panelů, která je nutná pro dosažení špičkového výkonu 1kWp.

Pokud výkon 1kWp u krystalických článků znamená cca 8 metrů čtverečních, pak u tenkovrstvé technologie je třeba cca 16 metrů čtverečních. Amorfni panely jsou odlišné rovněž svým vzhledem.

2.4.2 Výhody modulů z amorfniho křemíku

Moduly z amorfniho křemíku produkují v prvních 60 hodinách provozu přibližně o 30% vyšší výkon, než je výkon nominální (udávaný výrobcem). Dále je pak výkon cca o 15% vyšší, ale během jednoho roku postupně klesá, až se ustálí na výrobcem deklarované nominální hodnotě. Amorfni křemík má proti krystalickému křemíku jednu velkou výhodu, netrpí totiž tolik na letní přehřívání. Jeho účinnost s rostoucí teplotou klesá podstatně pomaleji, než jak je tomu u krystalického křemíku. V letních měsících je z amorfniích modulů lepší výtěžnost. Tenkovrstvé panely mají také vyšší citlivost na rozptýlené sluneční záření. Amorfni křemík je tak technologií vhodnou pro střechy, které nejsou vhodně orientovány. Pokud je kolektorové pole nutné orientovat spíše k východu nebo k západu, může být výhodnější použít tenkovrstvé moduly.

3. Stárnutí FV panelů

Defekty solárních článků vznikají již při samotné výrobě křemíku, při následném technologickém procesu výroby článku, nebo v průběhu života článku samotnou degradací fotovodivé vrstvy. Celková časová, energetická a finanční náročnost výroby článků vybízí proto ke zkoumání problematiky degradace článků, dále je uvedeno několik typů možných poruch, degradací a defektů.

3.1 Delaminace FV panelu

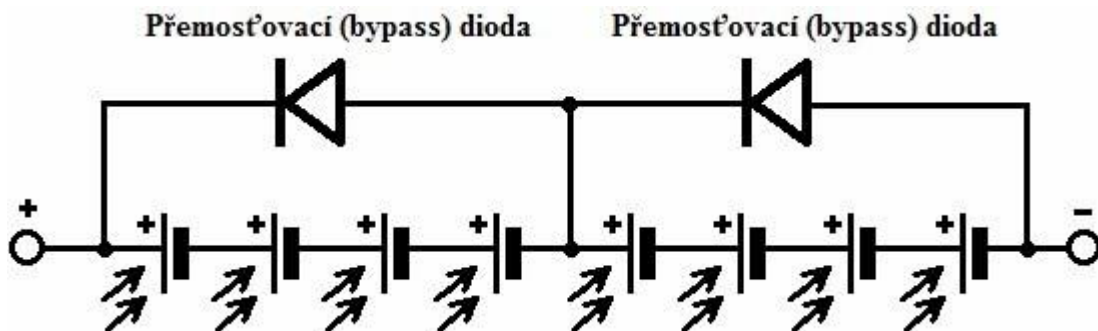
Delaminace fotovoltaiického panelu se projevuje oddělením jednotlivých vrstev panelu, zejména pak fólie EVA od FV článků a tvrzeného skla. Důsledkem této separace je vznik různých dutin a bublin mezi jednotlivými vrstvami panelu. Delaminace je závažná porucha, a to hlavně v případě pokud se vyskytne mezi články a rámem, protože působením korozivních účinků vody s chloridy dochází k vyplnění vzniklých dutin a k následnému porušení správné funkčnosti fotovoltaiického panelu. [8]



Obr. 5. delaminace panelu [8]

3.2 Proražení bypassové diody

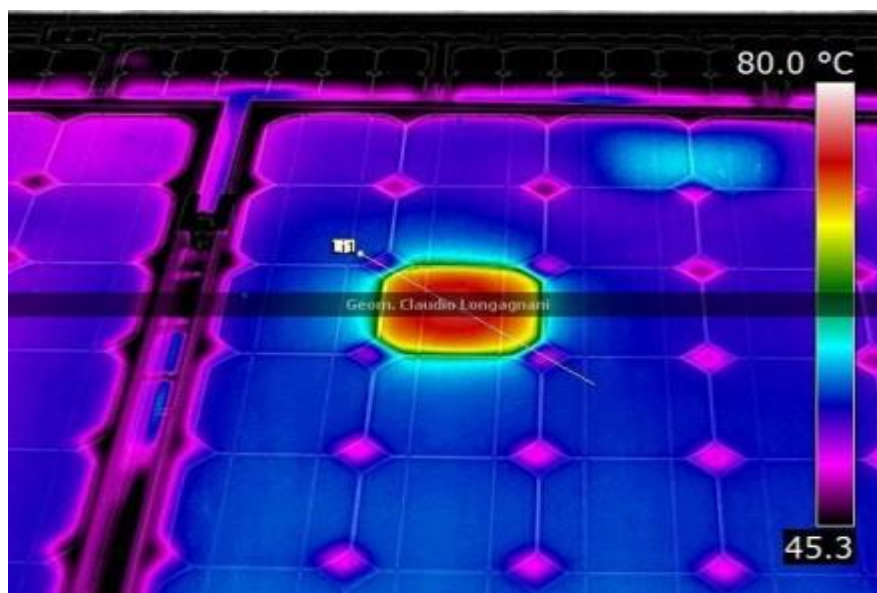
Bypassové diody mají velký význam v případě, že některé články jsou méně osvětleny, nebo zastíněny. V případě zastínění jednoho článku panelu dochází k situaci, kdy se zastíněný článek přestává chovat jako zdroj elektrické energie a začíná se chovat jako spotřebič, čímž dochází k jeho přehřívání a může dojít k nevratnému poškození celého panelu. Bypassové diody v těchto případech překlenou a odpojí zastíněný segment panelu.[8]



Obr. 6. bypass dioda

3.3 Horká místa

Velmi častým defektem fotovoltaických panelů je vznik horkých míst, tzv. hot spots. Horká místa vznikají v místech defektů krystalické mřížky fotovoltaických článků. Důsledkem toho pak takto poškozená místa mohou velmi intenzivně zahřívát. Pokud dosahuje teplotní rozdíl mezi různými místy 60°C a více jedná se již o závažný problém, který může vést k destrukci FV článku a tím i celého panelu. Vznik horkých míst lze v terénu pozorovat pomocí termokamery, ale pouze u krystalických panelů. Přesnější výsledky je možné získat v laboratoři s využitím elektroluminiscence.[8]



Obr. 7. horká místa [9]

3.4 Šnečí cestičky (Snailtrails)

Jedná se o poruchu, kdy se na povrchu fotovoltaických článků, pod krycím sklem a laminační vrstvou začnou objevovat změny zabarvení vypadající jako náhodné, až 1 cm široké cesty. „Šnečí cestičky“ jsou ohraničeny jednotlivými články, bývá jimi obvykle postiženo více článků v panelu. K jevu dochází upolykrystalických i monokrystalických panelů. Nejčastější teorií je, že šnečí cestičky vznikají kombinací několika faktorů:

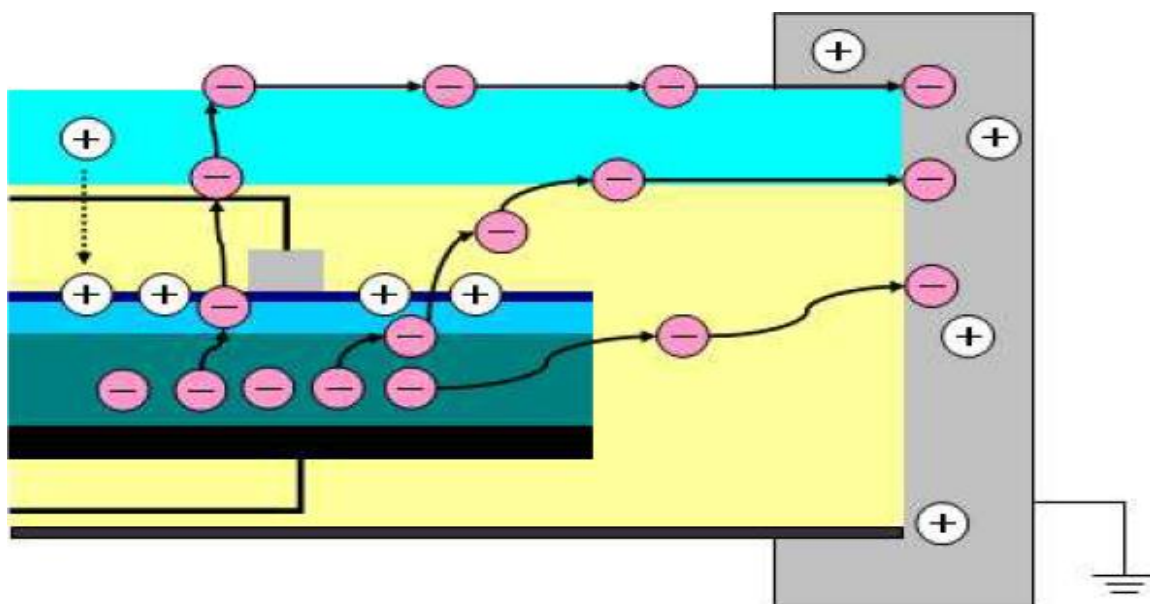
- mikrotrhliny ve fotovoltaických člancích
- použitá fólie EVA (etylvinylacetát) a chemické komponenty použité při její výrobě
- pravděpodobné pronikání vlhkosti do struktury FV panelu
- fyzikální a chemické jevy probíhající ve FV panelu při dlouhodobé expozici slunečnímu záření a provozním podmínkám venkovní prostředí.[10].



Obr. 7. Šnečí cestičky (Snailtrails) na FV panelu, převzato z [11]

3.5 Potential induced degradation (PID)

V minulosti málo známý a neprozkoumaný problém, který se však se zlevněním panelů a výskytu různé kvality panelů na trhu stal závažným. V češtině se tomuto jevu také říká vysokonapěťový stres, jedná se o fyzikální jev, který může způsobovat pokles výkonu, zdánlivě bez příčiny. Celý jev závisí především na pozici panelu ve stringu (umístění panelu v řetězci panelů), kde mají FV panely u záporného pólu napětí přibližně $-250 - 400$ V, zatímco rámy panelů mají z důvodů uzemnění napětí 0 V. V důsledku toho začnou vznikat svodové proudy, které za sebou zanechávají polarizaci a mohou tak negativně ovlivnit celou $V - A$ charakteristiku panelu (až nevratně poškodit křemíkovou strukturu) u kterého může klesnout do 4 let účinnost až o 70% a tím negativně ovlivnit účinnost celého systému. Tento jev se nemusí vyskytovat u všech panelů, závisí na výrobci a kvalitě panelů. Negativním dopadům PID lze předcházet uzemněním jednoho pólu generátoru, z čehož nám vyplývají další problémy, jako jsou bezpečnostní rizika a je nutno provádět měření izolací, některé systémy jako uzemněné vůbec provozovat nelze. Dalším způsobem prevence PID a dokonce jeho reverzi je speciální PID box, který mění polaritu mezi panelem a měničem, čímž by se měl jev obrátit a panel vrátit do původního stavu během několika měsíců. [12] Ovšem toto řešení nemusí zajistit, že se jev po nějakém čase opět nevrátí.



Obr. 8. Potential induced degradation [12]

4. Diagnostické metody

Diagnostické metody se používají pro detekci defektů solárních článků. Výroba fotovoltaických článků je velmi technologicky náročná a finančně náročná, z tohoto důvodu byla vytvořena řada diagnostických testů, které se snaží odhalit defekty již ve výrobě.

4.1 Termografie

Jedná se o nejjednodušší metodu, díky níž lze diagnostikovat fotovoltaický panel, či celý FVS v terénu. Princip této metody spočívá v elektromagnetickém vyzařování objektů, mimo viditelné spektrum a to v oblasti infračerveného záření, které dokáže člověk pozorovat pouze pokožkou ve formě tepla. Díky termokamerám lze určit místa článku (či panelu) s rozdílnými teplotami, které indikují závady, či degradaci panelu. Výhodou je jednoduchost a rychlost této metody, zároveň možnost porovnávání termografů různých panelů, či stejného panelu po časových intervalech a tím možnost určení výrobních nedostatků apod. Nevýhodou je, že nevíme, co přesně může za ohřátí a je potřeba provést sérii dalších testů.

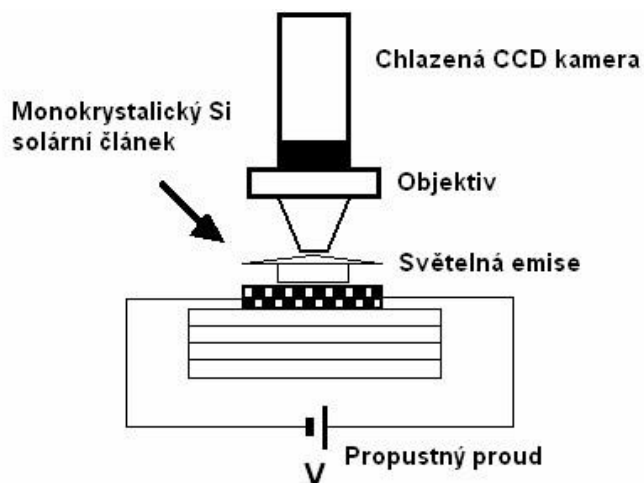
4.2 LBIC (LightBeamInducedCurrent)

Nejznámější a nejkoumanější metodou pro diagnostiku solárních článků je metoda LBIC. Jak již sám název napovídá, tato metoda využívá laserový paprsek, který je zaostřen na vzorek a díky lokální proudové odezvě z článku jsou získány XY charakteristiky rozložení proudu. Po té následuje analýza získaných dat, které jsou uspořádávány do proudové mapy, čímž je v podstatě vytvořen model chování celého článku po jeho jednotlivých částech. Na základě těchto získaných map je možné následně určit většinu lokálních defektů. Přesnost proudových map závisí především na druhu použitého laseru (hloubka vniku) a na kroku (míra přesnosti), s jakým se daný vzorek analyzuje. Z toho vyplývá nevýhoda této metody a tou je poměrně velká časová náročnost pro dosažení dostatečně hustých proudových map. [13]

4.3 Elektroluminiscence

Zmíněnou nevýhodu metody LBIC, kterou je časová náročnost, překonává poměrně nová metoda vyhodnocování defektů, zvaná elektroluminiscence. Časová náročnost této

metody se pohybuje v řádu sekund. Měření vychází z funkce fotovoltaického článku, v němž po připojení k elektrickému zdroji dochází k zářivé rekombinaci elektronů a děr a tím světelné emisi. Záření je v celé ploše vzorku snímáno buď velmi silně chlazenou CCD kamerou, nebo Indium Galium Arsenidovou kamerou, jejíž citlivost je v rozsahu 700 až 1600 nm



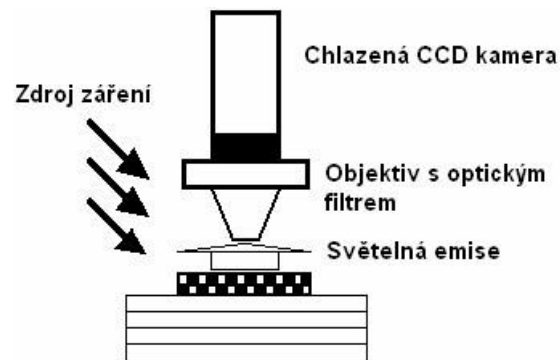
Obr. 9. Schéma měření metodou elektroluminiscence [13]

Defekty nevyzařují žádné nebo slabé záření a jsou na snímcích snadno pozorovatelné.

Tato technika může být aplikována nejen na solární články, ale i na sestavené panely. Nevýhodou této metody je potřeba tmavého prostředí, jinak by nebylo možno sledovat rekombinaci elektronů a proto je nutno laboratorních podmínek.[13]

4.4 Fotoluminiscence

Metoda fotoluminiscence je principem velmi blízká elektroluminiscenční metodě. Při fotoluminiscenci je energie nutná pro zářivou rekombinaci dodávána vnějším světelným zdrojem. Solární článek je ozařován světelným zářením o určité vlnové délce, která je odfiltrována optickým filtrem před CCD kamerou.[13]



Obr. 10. Schéma měření fotoluminiscence [13]

4.5. Sluneční simulátor s testerem

Sluneční simulátor je zařízení, které poskytuje uniformní světlo o spektru blízkému slunečnímu záření. Používá se pro testování fotovoltaických článků, nebo celých panelů.. Účelem tohoto zařízení je provádět kontrolní testy při laboratorních podmínkách. Světlo vycházející ze solárního simulátoru je řízeno v třech dimenzích:

- Spektrum světelného záření
- Prostorová jednotnost
- Časová stabilita

4.5.1 Typy solárních simulátorů

Solární simulátory je možno rozdělit do tří základních skupin: kontinuální, zábleskové a impulsní. První typ je běžná forma zdroje světla, jejíž osvětlení je spojitě v čase.

Druhým typem solárního simulátoru je takzvaný zábleskový (flash) zdroj světla. Principiálně se velmi blíží klasickému blesku používanému při fotografování. Charakteristickým rysem tohoto simulátoru je velmi krátká doba osvitu trvající řádově milisekundy o velmi vysoké intenzitě záření. Největší výhodou tohoto zařízení je právě velmi krátká doba osvitu, díky které nedochází k akumulaci tepla pod světelným zdrojem a tím nedochází k přehřívání testovaných solárních článků a panelů.

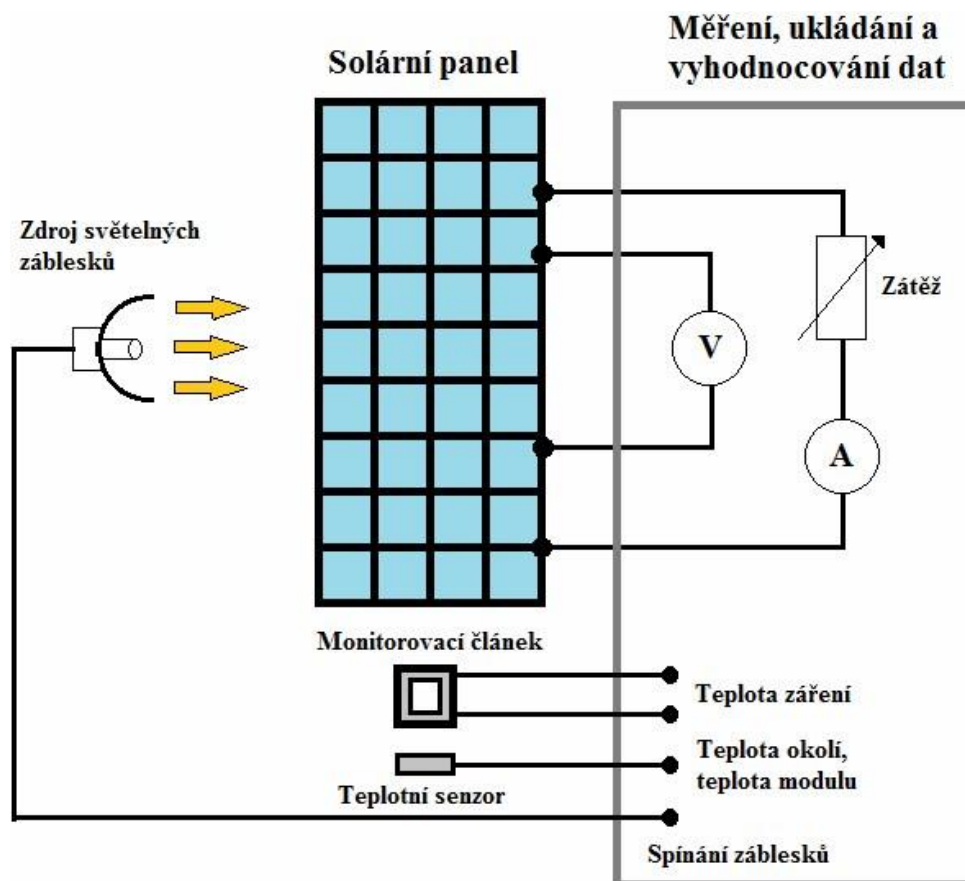
Třetí typ solárních simulátorů je pulzní simulátor, který využívá speciální závěrky zablokování a odblokování kontinuálního světelného zdroje. Tato kategorie je kompromisem mezi kontinuálním a zábleskovým světelným zářením.[14]

Flash tester

Flash simulátor vytváří velmi krátký záblesk o vysoké intenzitě ($1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$) k simulaci slunečního záření. Hlavním důvodem pro využití zábleskového světla je, jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, minimalizovat ohřev solárního článku v průběhu testování. Kompletní V-A charakteristika článku nebo modulu je změřena v okamžiku optimální intenzity světla.

Njedůležitější částí je takzvaný flasher (zdroj světelného záblesku), který generuje přesně kalibrovaný impuls světla. Pro vytvoření světelného impulsu je použita xenonová výbojka. Flash testery jsou zpravidla používány v pulzním módu pro minimalizaci spotřeby

elektrické energie, minimalizaci zahřívání testovaného modulu v průběhu měření a maximalizaci času mezi nutnými výměnami lampy. Existují jednopulzní nebo vícepulzní zařízení. U vícepulzních flash testerů se získává jeden bod V - A charakteristiky během jednoho záblesku, který trvá 1ms. Pro kompletní V – A charakteristiku je vyžadováno 100 bodů, tudíž musí proběhnout 100 záblesků. Jednopulzní zařízení produkují světelné pulsy trvající asi 50 až 100 ms a celá V – A charakteristika je získána v průběhu jednoho pulsu. Současným průmyslovým trendem je používání jednopulzního zařízení, kvůli menší časové náročnosti.



Obr. 11. Schéma flash testeru [14]

5. Parametry FVS, které se mění v průběhu života FVS

5.1 Metodika výpočtu celkové produkce elektrické energie FVS

Pro stanovení přibližné produkce elektrické energie FVS potřebujeme znát několik základních parametrů a to: celkový instalovaný výkon, lokalitu výstavby, ztráty v systému, účinnost FV panelů.

5.2 Odhad výroby

Pro odhad výroby z fotovoltaické elektrárny byl použit systém PVGIS (Fotovoltaický geografický informační systém – Photovoltaic Geographical Information System), vyvinutý vědeckou službou Evropské komise – Společným centrem pro výzkum. Tento systém umožňuje uživatelům odhadnout intenzitu slunečního záření na jakémkoliv místě v Evropě. Přesnost systému je dána statistickým sběrem dat, který probíhal v letech 1998 - 2010 v celé Evropě, která byla rozdělena na plochy o velikosti 1 x 1 km. Zde byly pravidelně odečítány hodnoty intenzity slunečního záření, teploty, apod.

Pomocí interaktivních map a počítačových simulací můžeme mimo jiné odhadnout potenciální výrobu z fotovoltaického systému v jednotlivých měsících. Výpočet se provádí podle vzorce:

$$E = 365 \cdot P_k \cdot r_p \cdot H_i.$$

P_k (kWp)	- špičkový instalovaný výkon systému
r_p	- odhadovaný výkonnostní poměr systému, obvyklá hodnota pro střešní systémy z mono- nebo polykrystalických křemíkových modulů je 0,75
$H_{h,i}$	- měsíční nebo roční průměr intenzity globálního záření

Měsíc	E_d	E_m
Leden	28,4	882
Únor	48,9	1370
Březen	78,5	2430
Duben	101	3020
Květen	97,1	3010
Červen	101	3020
Červenec	99,6	3090
Srpen	94,7	2930
Září	77	2310
Říjen	59,7	1850
Listopad	34,6	1040
Prosinec	26,8	832
roční průměr	70,6	2150
celkem za rok	25800	

Tab. 1. odhad pomocí systému PVGIS

E_d – průměrná denní produkce elektřiny (kWh)

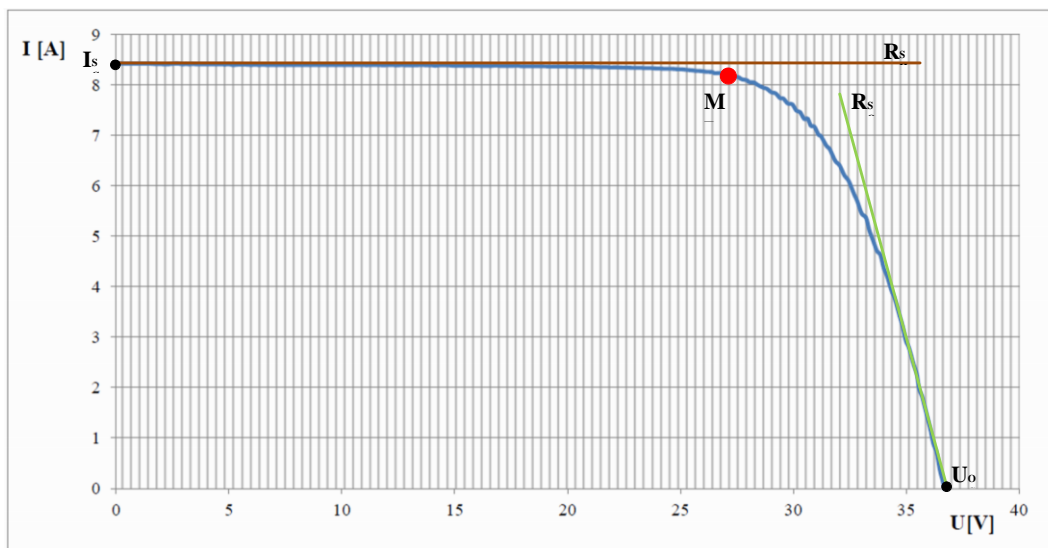
E_m – průměrná měsíční produkce elektřiny (kWh)

Tabulka 1 nám ukazuje zpracovaný výstup ze systému PVGIS a lze z ní vyčíst průměrné hodnoty vyprodukované energie za jednotlivé dny v měsíci, roční průměr denní produkce, měsíční průměry produkce energie a celkový roční odhad vyprodukované energie, jedná se o velmi hrubý odhad, jelikož každý rok může být diametrálně rozdílný než je předpoklad.

5.3 Elektrické parametry fotovoltaických panelů

5.3.1 Parametry odečtené z V – A charakteristiky

Z voltampérové charakteristiky popisující fotovoltaický panel lze vyčíst některé základní veličiny panelu. V – A charakteristika je grafickou závislostí proudu na napětí viz Obr. 11. [15]



Obr. 12. V-A charakteristika s vyznačenými základními veličinami

5.3.2 Zkratový proud

Zkratový proud je maximální proud při daném osvětlení a při nulovém napětí, je tedy roven proudu generovanému světlem, za předpokladu že odpor je nulový. Velikost zkratového proudu je závislá na intenzitě osvětlení, spektrální citlivosti, ozářené ploše a teplotě a pohybuje se řádově v jednotkách až desítkách A. [15]

5.3.3 Napětí naprázdno

Napětí naprázdno U_{oc} je maximální napětí na výstupních svorkách fotovoltaického panelu při nulovém proudu a bez připojené zátěže. U_{oc} je to maximální napětí fotovoltaického panelu při dané teplotě a intenzitě osvětlení. Velikost napětí naprázdno se pohybuje v desítkách až stovkách V. [15]

5.3.4 Pracovní bod

Pracovní bod je bod na $V - A$ charakteristice, ve kterém fotovoltaický panel zrovna pracuje. Poloha pracovního bodu je závislá na vlastnostech spotřebiče a měla by být shodná s polohou bodu s maximálním výkonem MPP (Maximum Power Point). Leží-li pracovní bod v bodě zkratového proudu nebo napětí naprázdno, negeneruje panel žádný výkon.

Pracovní bod je velmi závislý na teplotě. Pokud jsou zhoršené chladicí podmínky (např. bezvětrí), kdy teplota vzduchu dosahuje až ke 40°C nebo na panel dopadá po delší dobu sluneční záření s vysokou intenzitou, dochází ke zvýšení povrchové teploty panelu až na 80°C , což má za následek změnu jeho elektrických vlastností, která vede ke snížení svorkového napětí na zatěžovací charakteristice. Pokles svorkového napětí má za následek snížení dodávaného výkonu do zátěže. Jelikož k tomuto jevu dochází právě při největší sluneční intenzitě, může dojít až ke ztrátě 70% dosažitelné denní výroby panelu. Jako kompenzace toho jevu slouží optimalizační zařízení, které pracuje na principu řízení optimálního odporu zátěže. [15]

5.3.5 Bod maximálního výkonu MPP (Maximum Power Point)

Bod maximálního výkonu MPP je bod na $V - A$ charakteristice, který udává hodnotu maximálního výkonu. Bod MPP se udává prostřednictvím proudové a napěťové souřadnice z $V - A$ charakteristiky:

Maximální výkon P_{mpp} je hodnota výkonu, kterou je schopen panel dodávat. Bod P_{mpp} je přibližně ve středu ohybu voltampérové charakteristiky. Hodnota maximálního výkonu je dána vztahem. [15]

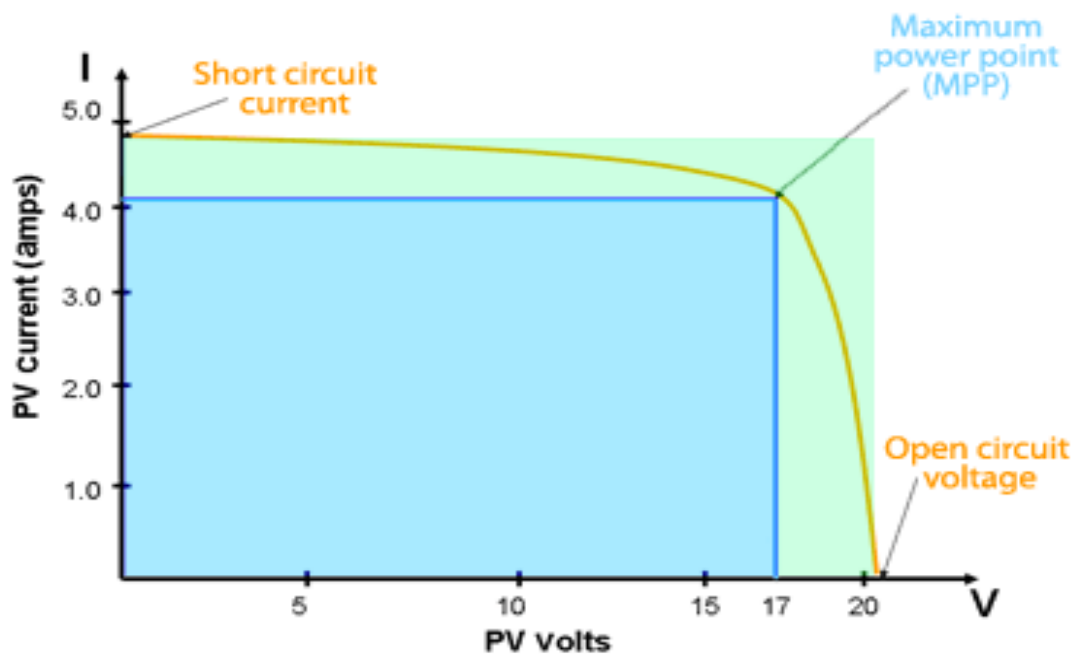
$$P_{mpp} = U_{mpp} \cdot I_{mpp},$$

- U_{mpp} – napětí, při kterém fotovoltaický článek dodává maximální výkon,
- I_{mpp} – proud, při kterém fotovoltaický článek dodává maximální výkon,
- P_{mpp} – maximální výkon, který se nachází v bodě uprostřed ohybu $V - A$ charakteristiky.

Sledovač maximálního pracovního bodu se snaží přizpůsobovat parametry zátěže tak, aby článek dodával neustále co nejvyšší výkon.

5.3.6 Fill Factor

Fill Factor FF udává poměr mezi maximálním výkonem P_{mpp} a výkonem daným zkratovým proudem I_{sc} a napětím na prázdno U_{oc} (na obrázku 13 podíl většího obdélníku proti menšímu). Závisí na kvalitě kontaktů, morfologii materiálu a odporu aktivní polovodivé vrstvy. Je nazýván také činitelem plnění, čím je jeho hodnota vyšší, tím větší výkon je schopen fotovoltaický panel do zátěže dodat. Obvyklá hodnota FF se pohybuje kolem 0,7 až 0,85 u panelů monokrystalického a polykrystalického křemíku, u amorfních panelů té bývá kolem 0,6. Fill Factor lze vyjádřit následujícím obrázkem:



Obr. 13. Určení fill facotru z V-A charakteristiky [16]

- FF - fill factor
- P_{MAX} - maximální výkon, který může panel skutečně dodávat
- P_T - maximální výkon, který by mohl panel dodávat
- I_{MP} - proud odpovídající bodu maximálního výkonu
- V_{MP} - napětí odpovídající bodu maximálního výkonu
- I_{SC} - proud odpovídající zapojení panelu nakrátko
- V_{OC} - napětí odpovídající rozpojenému panel

5.3.7 Účinnost fotovoltaického panelu

Účinnost fotovoltaického panelu je dána vlastnostmi materiálů, ze kterých je panel vyroben. Materiál ovlivňuje spektrální citlivost článku na dopadající záření, což znamená, že článek panelu využívá energii různých vlnových délek s různou účinností. Panely s monokrystalickými články dosahují účinnosti 15 až 18%, panely s polykrystalickými v rozsahu 13 až 16%. Účinnost článku fotovoltaického panelu lze definovat následující vztahem [15]:

$$\eta = \frac{U_{mpp} I_{mpp}}{P_{in}}$$

- η - účinnost
- U_{mpp} – napětí odpovídající bodu maximálního výkonu
- I_{mpp} – proud odpovídající bodu maximálního výkonu
- P_{in} – celkový dopadající výkon

6. Praktická část

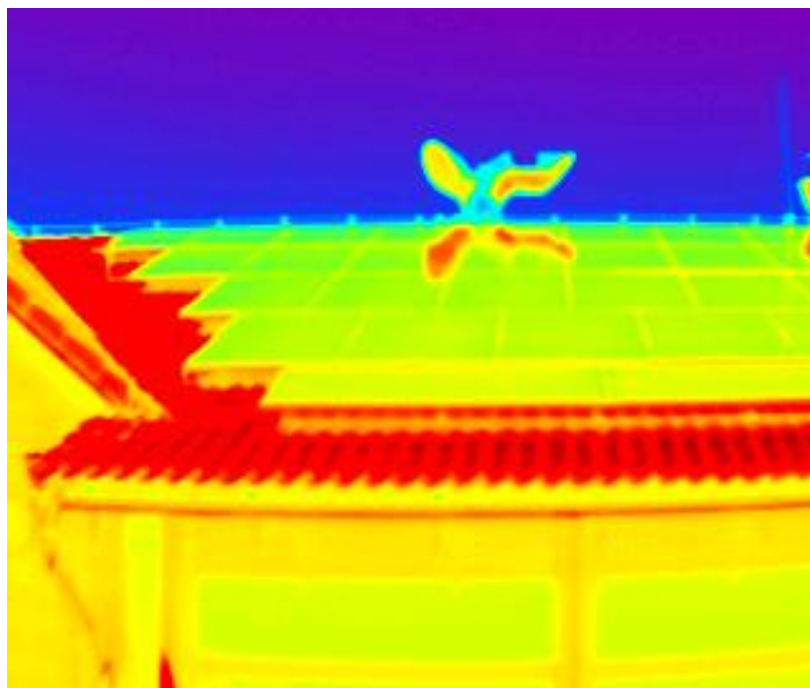
V praktické jsme otestovali skutečnou fotovoltaickou elektrárnu základními metodami. Provedli jsme měření termokamerou a pomocí přístroje EurotestPV od firmy Metrel jsme provedli měření voltampérových charakteristik. Jelikož nebyly nalezeny žádné defekty, a to ani mechanická poškození při důkladné vizuální kontrole všech 98 panelů. Provedli jsme další měření pomocí flash testeru PASAN a elektroluminiscenci v laboratořích FEL, na jiných panelech, které nebyly součástí elektrárny.

6.1 Technické údaje FVE

Elektrárna má nainstalováno 98 ks monokrystalických fotovoltaických panelů typu CNPV-300M o výkonu 300Wp s celkovým výkonem 29,4kWp. Panely jsou sériově propojeny do 7 stringů (řetězců), každý po 14 - ti kusech a vyvedeny do 2 střídačů typu Refusol15K(do jednoho 3, do druhého 4 stringy) s maximálním vstupním výkonem (DC strana) 17,5 kW, 900V, 36A a maximálním výstupním výkonem 15kW, 400V AC/50Hz, 25A. Střídače jsou navíc doplněny sledováním aktuálního výkonu s možností připojením na internet a dlouhodobým sledováním výkonů FVE a případného hlášení závad na střídači. Elektrárna je umístěna na střeše firmy Rovyna ve vesnici Rojšín 12km od Českého Krumlova (Location: 48°54'51" North, 14°14'55" East, Elevation: 557 m n. m.).

6.2 Měření termokamerou

Díky přenosnosti termokamery a okamžitým výsledkům jde o nejjednodušší způsob kontroly(ihned po vizuální kontrole), který dokáže odhalit hrubé závady na jednotlivých panelech a dokonce i jednotlivých článků panelu. Panely, na kterých dojde k výraznějšímu poklesu výkonu oproti ostatním panelům ve stringu, se začnou chovat jako spotřebiče a tím se nadměrně zahřívají, což je vidět na termokameře(viz. Obrázek 7). Může k tomu dojít například zastíněním, degradací panelu apod. Na obrázcích 14 a 15 jsou vidět snímky měřené elektrárny, je zde názorně vidět, jak se projeví zastínění vývodů vzduchotechniky a výsledné zastínění panelů na termosnímčích tmavším odstínem červené. Naproti tomu na zbytku snímku vidíme stejné odstíny zelené z čehož vyplývá, že zde nejsou žádné vážné závady. Zbytek panelů dopadl stejně a obrázky jsou uvedeny v příloze.



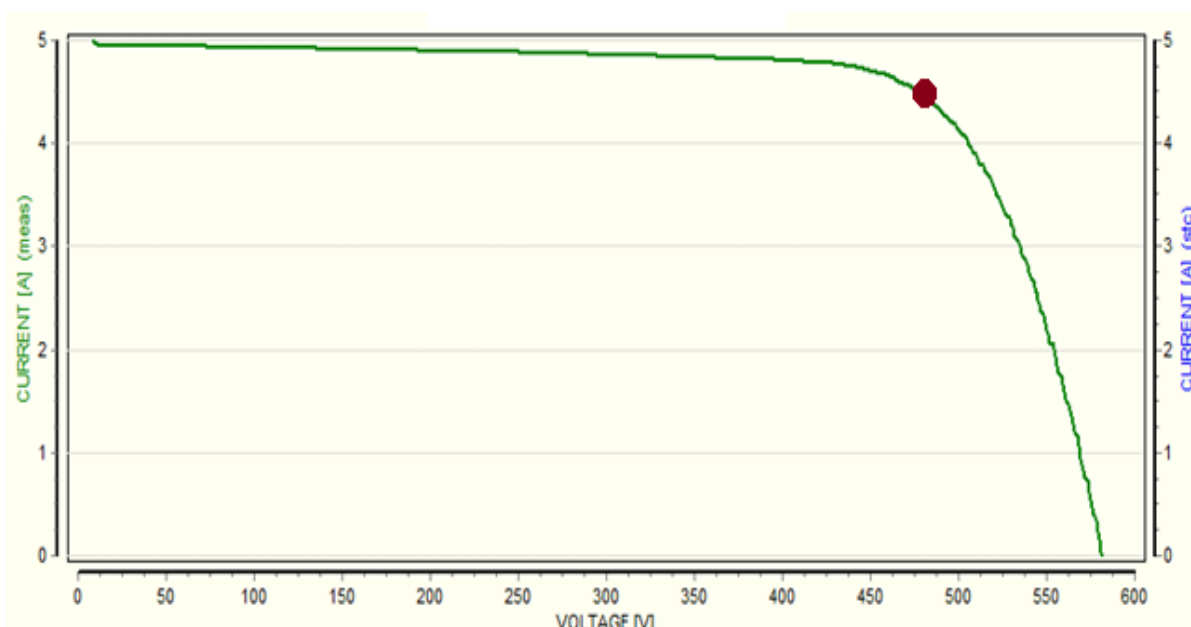
Obr. 14. Střecha pod termokamerou 1. část, zastínění



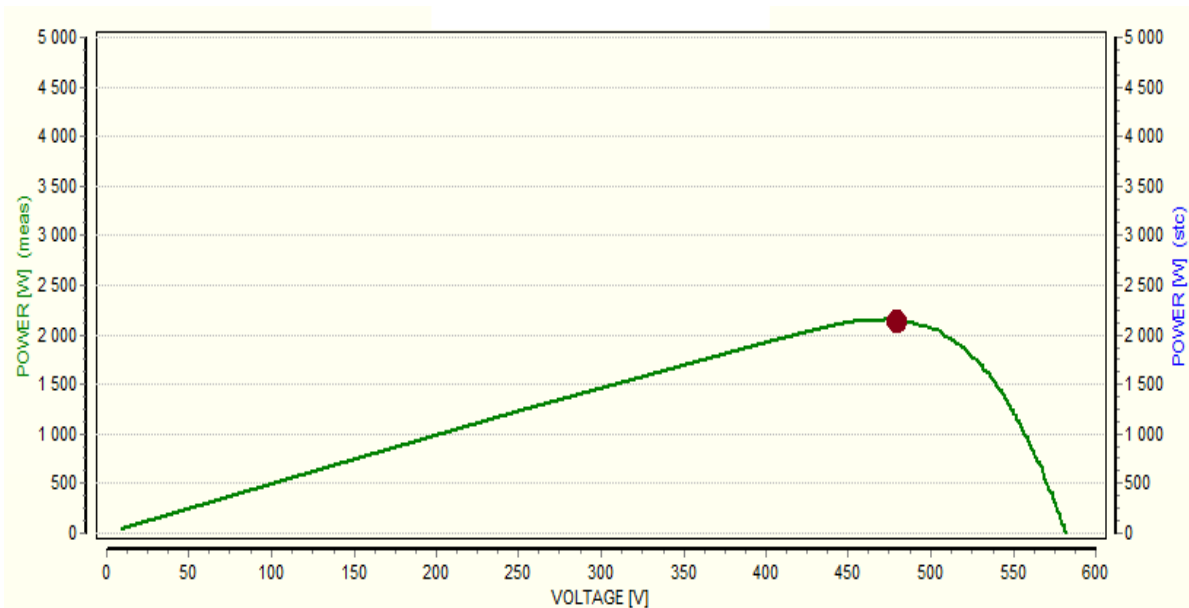
Obr. 15. Střecha bez termokamery 1. část, zastínění

6.3 Měření V- A charakteristik

Druhým nejjednodušším druhem hrubé diagnostiky je měření voltampérových charakteristik, používáme k tomu přístroj EurotestPV, který se připojí na jednotlivý string a sleduje průběh napětí a proudu s proměnlivým výstupním odporem. Charakteristický průběh můžeme vidět na obrázku 13, jde především o tvar křivky, který vypovídá o tom zda je string v pořádku nebo ne, navíc zařízení měří průběh výkonu a bod maximálního výkonu. Pokud by měla křivka jiný tvar, nebo měl jeden string výrazně nižší výkon než ostatní, bylo by nutné změřit V – A charakteristiky jednotlivých panelů ve stringu a tím určit, který panel je závadný(případně i více panelů). Dále je nutné sledovat zda se nějaký string neliší výrazně výkonem. Na obrázku 16 je vidět, že průběh má charakteristický tvar, bez jakýchkoliv „skoků“, či strmého poklesu.



Obr. 16. voltampérová charakteristika



Obr. 17. průběh výkonu ve voltampérové charakteristice

I/V

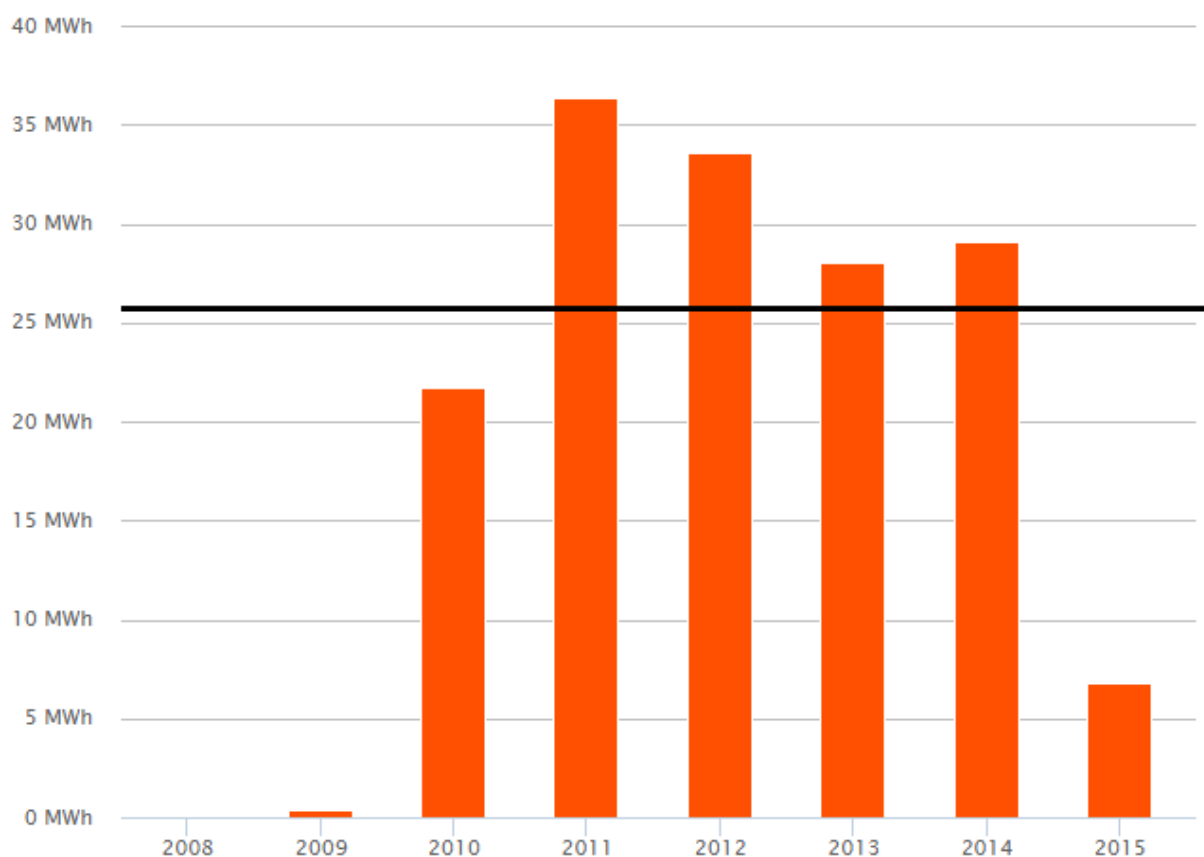
	MEAS
U _{oc}	581 V
I _{sc}	4.97 A
U _{mpp}	472 V
I _{mpp}	4.56 A
P _{mpp}	2.15 kW

Obr. 18. Údaje z přístroje EurotestPV

6.4 Porovnání teoretických hodnot se skutečnými

Střídače Refusol 15K mají z výroby osazenou jednotku pro snímání aktuálních hodnot výkonu, proudu, napětí a vyrobené energie. Díky tomu jsme byli schopni dostat se ke skutečným údajům o vyrobené elektřině v libovolných úsecích, jak roční, měsíční, i denní úhrny, lze díky tomu porovnat předpokládané údaje predikované pomocí systému PVGIS a reálným hodnotám. V obrázku 17 je ve sloupcích uvedena vyrobená energie a černá čára představuje hranici energie odhadované pomocí PVGIS, rok 2009 a rok 2015 nemůžeme

z tohoto hlediska posoudit, jelikož nejsou celé. Z grafu jsou patrné výrazné výkyvy, např. roku 2010 bylo vyrobeno téměř o 15MWh než v roce 2011. Po zprůměrování let 2010 až 2014 zjistíme, že bylo vyrobeno o 15% více energie než jsme odhadovali (29 757 MWh).



Obr. 19. záznam výroby energie a odhad pomocí PVGIS

6.5 Vyhodnocení stavu elektrárny

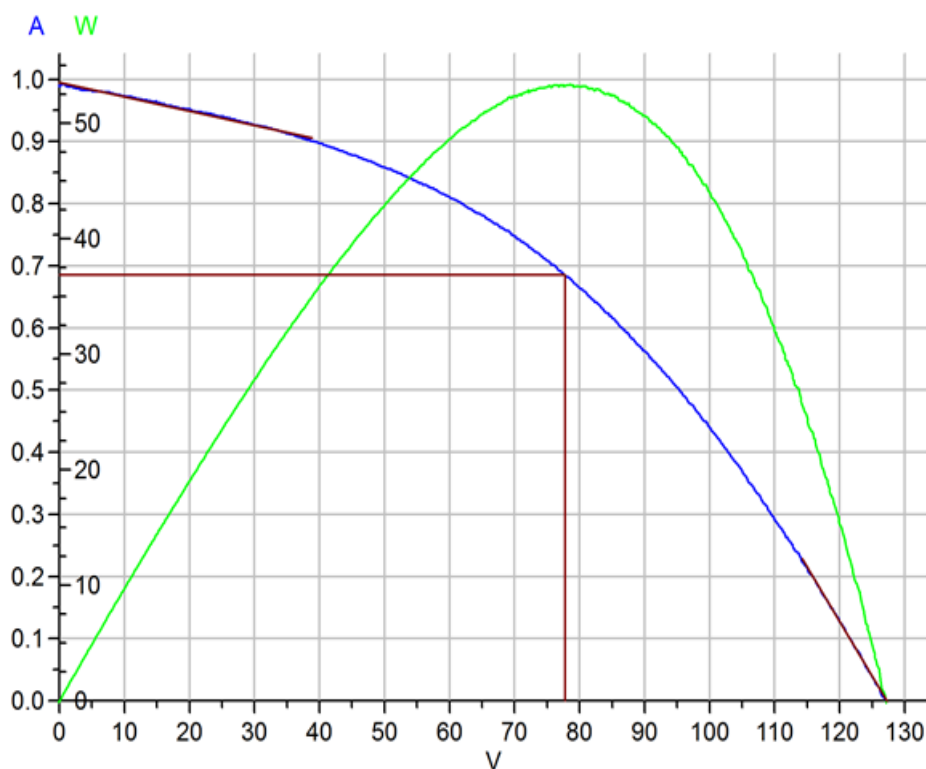
Hodnotili jsme elektrárnu několika metodami, nejdříve jsme provedli vizuálně kontrolu panelů, měřili jsme termokamerou a poté jsme dělali V – A charakteristiku a ani jednou metodou jsme nenalezli žádné problémy, na snímcích termokamery měly všechny panely i jednotlivé články panelů stejné odstíny a tudíž stejnou teplotou, čímž jsme vyloučily veškeré defekty snižující výkon panelu(viz. kapitola 7.2).

Pomocí měření V – A charakteristik, které jsme prováděli na každém stringu, nebyly nalezeny žádné nesrovnalosti, sledovali jsme typické průběhy charakteristiky a výkon kolísal v řádu procent, což mohly zapříčinit jiné vlivy, neboť výkon pomalu klesal v závislosti na pozdějším čase měření posledních stringů(důsledek stmívání).

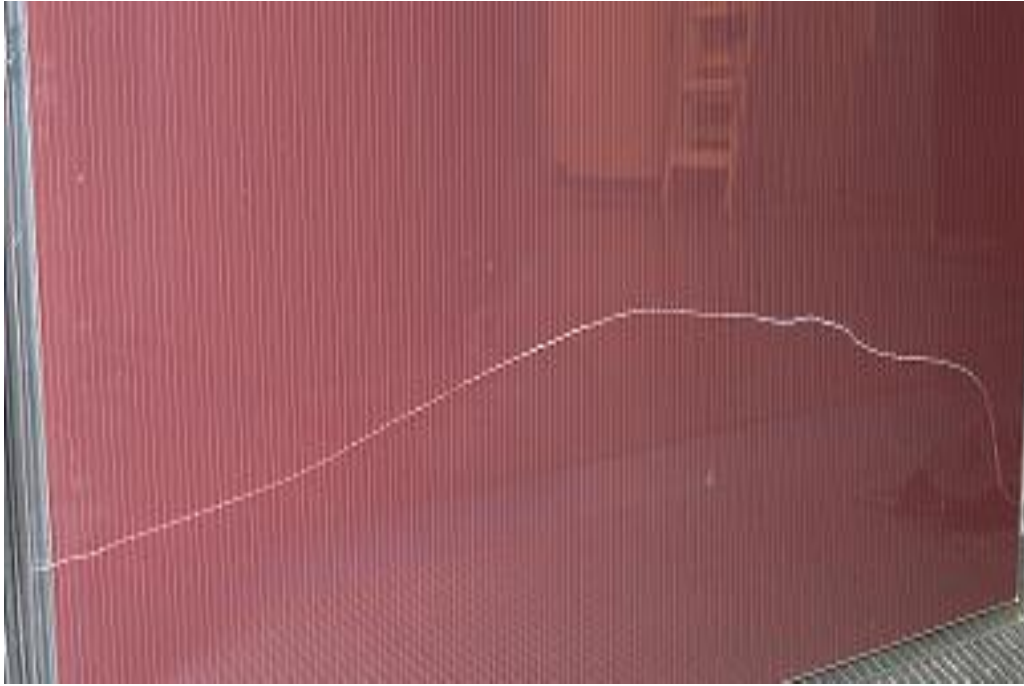
Jelikož jsme vyhodnotili stav elektrárny jako výborný a její výrobu dokonce větší než předpokládanou, nebyl důvod provádět detailnější testy, které jsme provedli v laboratořích na katedře elektrotechnické fakulty na zkušebních panelech.

6.6 Měření pomocí flash testeru PASAN

Jelikož v praktické části hrubá měření neodhalila žádné viditelné závady, rozhodli jsme se pro laboratorní měření vybraných panelů se závažnými viditelnými chybami či defekty a působení těchto vad na charakteristiky panelů. Měření probíhalo v laboratoři diagnostiky fotovoltaických systémů na přístroji PASAN - Sun Simulator IIIc. Na obrázku 20. je V – A charakteristika amorfního panelu, z charakteristiky je vidět velmi rychlý pokles proudu a s ním i nízký fill factor(41%) a z toho i vyplývající nízký maximální výkon, který by měl být 80W, ale je pouze 54W, důvodem může být vodorovná prasklina přes celou spodní část panelu, nebo degradace P – N přechodu způsobená amorfni technologií a časovou degradací materiálu.



Obr. 20. flash test amorfního panelu

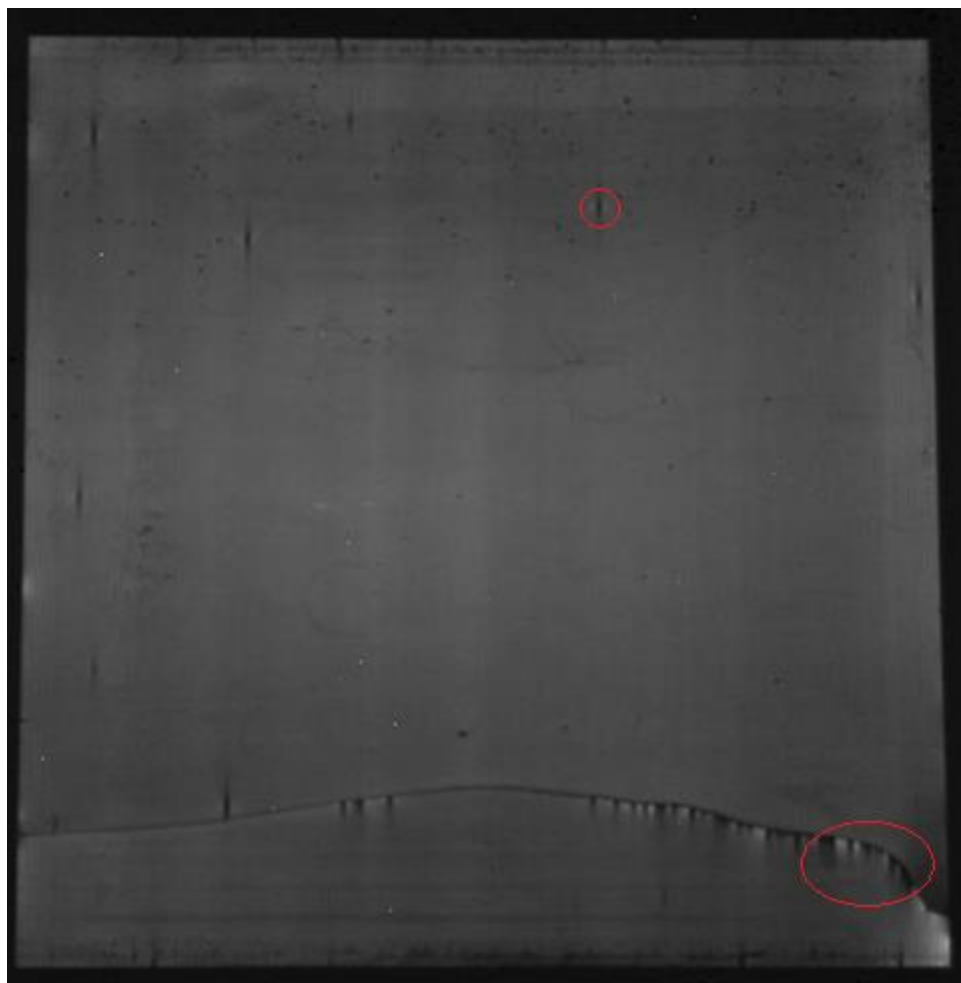


Obr. 21. prasklina, tenkovrstvý amorfni panel

6.7 Měření elektroluminiscence

6. 7. 1 Tenkovrstvý amorfni panel 80W

Stejně jako u flash metody jsme se rozhodli provést měření stejných panelů pomocí elektroluminiscence a pozorovat výsledky. Nejdříve jsme zkoumali tenkovrstevný amorfni panel o výkonu 80W, jak je vidět na obrázku 22. v okolí praskliny a i na jiných několika místech panel „nesvítí“ (neprobíhá rekombinace elektronů) což znamená nefunkční místa panelu. Nefunkční místa v okolí praskliny jsou zapříčiněny vlhkostí, která pronikla do panelu a zničila P – N přechody, kdežto černé tečky na různých místech panelu jsou pouze závady vzniklé v průběhu výrobního procesu a nemají velký vliv na posuzování výkonu panelu, protože jsou panely po výrobě testovány a podle toho je jim přiřazen štítek s výkonem a ostatními údaji. Dá se předpokládat, že po dlouhodobějším vystavení panelu venkovním podmínkám by se vlhkost šířila dále do panelu a došlo by k postupnému poklesu výkonu.



Obr. 22. elektroluminiscence panelu, tenkovrstvý amorfni 80 W

6. 7. 2 Tenkovrstvý amorfni panel 95W

Důkazem malého vlivu výrobních závad panelů na jejich výsledný výkon je krásně vidět na obrázku 23. Panel má celou plochu pokrytou rozsetými vadnými P – N přechody, které pochází z výroby a s časem se nemění, tudíž byl panel označen za 95W a od tohoto výkonu se neodkloňuje (94,1W) a V – A charakteristika má dobrý tvar, názorně tento jev lze pozorovat na obrázku 24.



Obr. 24. elektroluminiscence panelu, tenkovrstvý CIGS 95 W

7. Závěr

Cílem bakalářské práce bylo především nastínit v teoretické části problematiku fotovoltaických technologií, generace vývoje panelů s jejich klady a zápory, různé typy defektů, které se u nich vyskytují a diagnostické metody odhalující je.

V praktické části byl popsán běžný návrh postupu diagnostiky fotovoltaického systému s predikcí odhadu výroby elektrárny a následná reálná měření a porovnání odhadovaných hodnot s hodnotami skutečnými, které jsme měli k dispozici. Z našich měření jsme dospěli k závěru, že je elektrárna i po šesti letech ve špičkovém stavu a vyrábí dokonce více energie než jsme odhadovali.

V poslední řadě jsme změřili v laboratoři diagnostiky fotovoltaických systémů na fakultě elektrotechnické $V - A$ charakteristiky všech panelů s vizuálně prokazatelným poškozením a tytéž testy provedli v laboratoři pro měření elektroluminiscence. Překvapivě se ukázalo, že viditelné mechanické poškození nemělo na $V - A$ charakteristiku panelů velký vliv, kdežto na elektroluminiscenci jsme pozorovali v místech fyzického poškození šíření poruch v P – N přechodech.

Seznam obrázků

Obr. 1. monokrystalický článek , podle lit. [3].....	10
Obr. 2. polykrystalický článek zdroj, podle lit. [5].....	10
Obr. 3. Solární článek CIGS, podle lit. [6]	11
Obr. 4. panel z amorfního křemíku, podle [7]	12
Obr. 5. delaminace panelu [8]	14
Obr. 6. bypass dioda	15
Obr. 7. horká místa [9]	15
Obr. 7. Šnečí cestičky (Snailtrails) na FV panelu, převzato z [11]	16
Obr. 8. Potential induced degradation [12].....	17
Obr. 9. Schéma měření metodou elektroluminiscence	19
Obr. 10. Schéma měření fotoluminiscence.....	20
Obr. 11. Schéma flash testeru	22
Obr. 12. V-A charakteristika s vyznačenými základními veličinami.....	25
Obr. 14. Střecha pod termokamerou 1. část, zastínění	30
Obr. 15. Střecha bez termokamery 1. část, zastínění.....	30
Obr. 16. voltampérová charakteristika	31
Obr. 17. průběh výkonu ve voltampérové charakteristice.....	32
Obr. 18. Údaje z přístroje EurotestPV	32
Obr. 19. záznam výroby energie a odhad pomocí PVGIS.....	33
Obr. 20. flash test amorfního panelu	34
Obr. 21. prasklina, tenkovrstvý amorfní panel	35
Obr. 22. elektroluminiscence panelu, tenkovrstvý amorfní 80 W.....	36
Obr. 24. elektroluminiscence panelu, tenkovrstvý amorfní 95 W.....	37

Seznam použitých zdrojů

- [1] Fotovoltaika. *Green Technology s.r.o. – obnovitelné zdroje*. [online]. 18.5.2015 [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: <http://www.green-t.cz/fotovoltaika/>
- [2] Matuška, T., *Solární soustavy pro bytové domy*, vydání, GradaPublishing, a.s., 2010. ISBN 978-80-247-3503-0
- [3] Střešní instalace. ©2009 *General Energy*. [online]. 7.4.2015 [cit. 2015-04-07]. Dostupné z: <http://www.stresniinstalace.cz/fotovoltaika/fve-panel/>
- [4] Solar Energy Payback Time . *CleanTechnica*. [online]. 18.5.2015 [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: <http://cleantechnica.com/2013/12/26/solar-energy-payback-time-charts/>
- [5] *Fotovoltaika pro každého* [online]. c2003-2009 [cit. 2009-12-30]. Dostupný z WWW: <http://www.czrea.org/cs/druhy-oze/fotovoltaika/#fv_cr>.
- [6] marketplace.yet2. *yet.2*. [online]. 7.4.2015 [cit. 2015-04-07]. Dostupné z: <http://marketplace.yet2.com/app/insight/techofweek/43972>
- [7] Solární amorfní panel 36W. *123store*. [online]. 7.4.2015 [cit. 2015-04-07]. Dostupné z: <http://www.123store.cz/solarni-panely/solarni-amorfni-panel-36w>
- [8] TOMĚŠ, Milan. *Zkušenost soudního znalce z posuzování FVE v roce 2011*. Ostrava, 2012. Unie soudních znalců.
- [9] Controllo impianti fotovoltaici. *Termografia*. [online]. 7.4.2015 [cit. 2015-04-07]. Dostupné z:http://www.reamodena.com/1/controllo_impianti_fotovoltaici_7115867.htm
- [10] JAKUBES, Jaroslav. *Fenomén „SnailTrails“ / „šnečí cestičky“: — je ohrožen výkon FVE?*. In: TZB-info [online]. 2012 [cit. 2013-03-16]. Dostupné z WWW: <<http://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/9020-fenomen-snail-trails-snecicesticky>>.
- [11] First Green Consulting Pvt. *Snail Trail on your PV module: A disease or symptom?*. [online]. 12.5.2015 [cit. 2015-05-12]. Dostupné z:<http://www.firstgreen.co/2014/09/snail-trail-on-your-pv-module-a-disease-or-symptom/>

- [12] Pokles výkonu fotovoltaických elektráren v důsledku vysokonapěťového stresu Zdroj: <http://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/12260-pokles-vykonu-fotovoltaickych-elektren-v-dusledku-vysokonapetoveho-stresu>. *TZB-info*. [online]. 10.4.2015 [cit. 2015-04-10]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/12260-pokles-vykonu-fotovoltaickych-elektren-v-dusledku-vysokonapetoveho-stresu>
- [13] VALA, Z. *Fotoluminiscenční metody detekce defektů solárních článků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. Diplomové práce.
firstgreen.co/2014/09/snail-trail-on-your-pv-module-a-disease-or-symptom/
- [14] Citation. In *Wikipedia: the free encyclopedia*[online]. last modif. 4 November 2010 [cit. 2011-05-11]. Dostupný z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_Simulator>.
- [15] Welcome to PVCDROM. *pveducation*. [online]. 13.5.2015 [cit. 2015-05-13]. Dostupné z: <http://pveducation.org/pvcdrom>
- [16] Solar cells and IV curves. *Harness the Sun*. [online]. 13.5.2015 [cit. 2015-05-13]. Dostupné z: https://nationalvetcontent.edu.au/alfresco/d/d/workspace/SpacesStore/4e1e0e97-bc55-4c44-a692-4d31f4d0d934/13_02/content_sections/learn_about/08_solar_page_006.htm