



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta elektrotechnická
Katedra elektrotechnologie**

Analýza výkonu FVE při částečném poškození stringu

**Analysis of photovoltaic power plant at partial string
damage**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Bc. František Hezina

Studijní program: Inteligentní budovy

Studijní obor: Inteligentní budovy

Vedoucí práce: Ing. Tomáš Finsterle

Praha, 2019

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že diplomovou práci s názvem "Analýza výkonu FVE při částečném poškození stringu" jsem zpracoval samostatně a s použitím uvedené literatury a podkladů.

V Praze dne 12.8.2019

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Hezina** Jméno: **František** Osobní číslo: **372531**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra měření**
Studijní program: **Inteligentní budovy**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Analýza výkonu FVE při částečném poškození stringu

Název diplomové práce anglicky:

Analysis of photovoltaic power plant at partial string damage

Pokyny pro vypracování:

1. Zpracujte rešerši na téma vlivu poškození modulů na výkon FVE
2. Simulujte vliv částečného poškození/zastínění stringu modulů na výkon celého bloku (1 měnič) pro různé konfigurace (různý počet sério-paralelních kombinací)
3. Výsledky experimentálně ověřte na reálném fotovoltaickém systému

Seznam doporučené literatury:

- [1] CASTAÑER, Luis a Santiago SILVESTRE. Modelling photovoltaic systems using PSpice. Hoboken, NJ: J. Wiley, c2002. ISBN 978-0-470-84527-1.
[2] LUQUE, A., HEGEDUS, S. Handbook of photovoltaic science and engineering [online]. 2. Hoboken, NJ: Wiley, c2011. ISBN 978-0-470-97466-7. Dostupné z: <http://eu.wiley.com/WileyCDA/WileyTitle/productCd-0470976128.html>

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Tomáš Finsterle, katedra elektrotechnologie FEL

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

Datum zadání diplomové práce: **05.02.2019**

Termín odevzdání diplomové práce: **15.8.2019**

Platnost zadání diplomové práce:

do konce letního semestru 2019/2020

Ing. Tomáš Finsterle
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

28.2.2019

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Abstrakt

Při výrobě elektrické energie z neobnovitelných zdrojů se do atmosféry uvolňuje velké množství škodlivých látek a skleníkových plynů, které mají značný dopad na zvyšování průměrné teploty atmosféry. Jelikož tento sekundární efekt spalování fosilních paliv povede v příštích desetiletích nevyhnutelně k celosvětovým ekonomickým problémům, je nezbytné tyto emise co nejdříve výrazně redukovat. Pro dosažení tohoto cíle se v současnosti nejlepším řešením jeví být postupné opuštění výroby energie z fosilních zdrojů a jejich nahrazení zdroji obnovitelnými, pod které spadá například fotovoltaika, větrná, či geotermální energie. Solární fotovoltaické (FV) technologie při výrobě elektrické energie přímo neemitují žádné skleníkové plyny. Jsou však, stejně jako každá jiná technologie, náchylné k poruchám, kterým je potřeba předcházet a v případě jejich výskytu je co nejúčinněji lokalizovat a eliminovat.

V této práci jsou vysvětleny charakteristiky a hlavní sledované veličiny FV článků a modulů, nutné k jejich komplexní analýze. Dále byly v teoretické části popsány poruchové módy, které se mohou při provozu fotovoltaické elektrárny (FVE) objevit a možné postupy k jejich detekci.

V praktické části bylo provedeno měření jednoho stringu modulů na FVE Onyx II, při simulaci poruch skupin článků jejich částečným, či úplným zastíněním. Aby byl dopad stavu zastínění minimalizován, je žádoucí mít možnost předvídat výkon systému s fotovoltaickými moduly během stínění. Proto byl na základě výsledků měření vytvořen odpovídající jednodiodový model stringu v softwaru LTspice a jeho výstupy byly porovnány s realitou. Výsledky simulace se ukázaly být ve velmi dobré shodě s naměřenými hodnotami.

Při měření na FVE byly, pro různé konfigurace zastínění jedné z šesti paralelních větví obsahující 17 modulů, odečteny hodnoty elektrických veličin z instalovaného střídače. Na základě těchto měření byla provedena analýza vlivu několika variant zastínění jedné větve na vstupní a výstupní parametry střídače. Bylo zjištěno, že střídač při určitých konfiguracích ztrácí významně vyšší procento výkonu, než odpovídá zastíněné ploše modulů.

V závěru práce jsou diskutovány vlivy různých konfigurací zastínění na výkon systému a limitace vytvořeného LTspice modelu.

Abstract

When generating electricity from non-renewable sources, large amounts of harmful substances and greenhouse gases are released into the atmosphere, which have a significant impact on increasing the average temperature of the atmosphere. Since this secondary effect of burning fossil fuels will inevitably lead to global economic problems in the coming decades, it is necessary to significantly reduce these emissions as soon as possible. To achieve this goal, the best solution seems to be the gradual abandonment of energy production from fossil sources and their replacement by renewable sources, such as photovoltaics, wind or geothermal energy. Solar photovoltaic (PV) technologies do not directly emit any greenhouse gases in power generation. However, they are, like any other technology, susceptible to malfunctions that need to be prevented and, if they occur, be localized and eliminated as effectively as possible.

This work explains characteristics and main monitored variables of PV cells and modules necessary for their complex analysis. Furthermore, the theoretical part describes the failure modes that may occur during the operation of photovoltaic power plant (PVP) and possible procedures for their detection.

In the practical part, one string of modules was measured on the PVP Onyx II, simulating the failure of cell groups by their partial or total shading. In order to minimize the impact of the shading condition, it is desirable to be able to predict the performance of the photovoltaic module system during shading. Therefore, based on the measurement results, a corresponding single-diode model of the string was created in LTspice software and its outputs were compared with reality. The simulation results proved to be in very good agreement with the measured values.

During the measurements at PVP, for various shading configurations of one of the six parallel strings containing 17 modules, the values of the electrical quantities were read from the installed inverter. Based on these measurements, an analysis of the effect of several shading variants of one branch on the input and output parameters of the inverter was performed. It has been found that in certain configurations, the inverter loses a significantly higher percentage of power than would correspond to the shaded area of the modules.

Finally, the effects of different shading configurations on system performance and limitations of the LTspice model are discussed.

Poděkování

Děkuji vedoucímu své diplomové práce za předání klíčových vědomostí a trpělivosti během jejího vytváření.

Děkuji také rodině a kamarádům za jejich neustálou podporu během studia a Ing. Báře Janů za pomoc s grafickou a stylistickou úpravou.

Obsah

Úvod	3
1. Teoretická část	5
1.1. Princip funkce FV článku	10
1.1.1. Model FV článku a rovnice základních sledovaných parametrů	12
1.1.2. V-A charakteristika	15
1.2. Časová degradace modulů	19
1.3. Defekty fotovoltaických modulů	20
1.3.1. Částečné zastínění	23
1.3.2. Hot spoty	29
1.3.3. Mikro praskliny	30
1.4. Možnosti detekce závad na FV modulech	33
1.4.1. Analýza V-A charakteristiky	34
1.4.2. Analýza pomocí Kirchhoffova proudového zákona	36
1.4.3. Zachování energie	36
2. Praktická část	39
2.1. Software k vytvoření modelu FV systému	41
2.1.1. Model FVČ	41
2.1.2. Model stringu modulů	42
2.2. Měření na FVE	44
2.2.1. Elektrárna Onyx II	44
2.2.2. Použité přístroje	46
2.2.3. Metoda měření: V-A charakteristiky	47
2.3. Výsledky měření V-A charakteristik a shoda s modelem	49
2.3.1. Křivky intenzity záření a teploty během měření	49
2.3.2. Měřený string modulů	49
2.3.3. Grafické znázornění simulovaných případů zastínění	50
2.4. Měření na střídači	55
2.4.1. Měření proudů fází na střídači	55
2.4.2. Konfigurace zastínění – měření na střídači	56
2.4.3. Naměřené hodnoty v grafech a tabulkách	58
2.4.4. Věrnost vytvořeného LTspice modelu	61
2.4.5. Diskuse výsledků měření na střídači	64
2.4.6. Reakce stringu na zastínění	65
Zhodnocení a závěr	67
Reference	69
Seznam obrázků	72
Seznam tabulek	74
Nomenklatura symbolů	75

Úvod

Fotovoltaické elektrárny se v posledních letech vlivem celosvětových vládních podpůrných programů staly velkým hitem a není tedy divu, že se do pozornosti vědeckého výzkumu dostala i otázka jejich spolehlivosti.

Žádný systém není bezporuchový a kvalita řešení spočívá vedle minimalizace poruchovosti i ve schopnosti se s případnou poruchou vyrovnat. Mimo jiné to vede k neustálému tlaku na jeho optimalizaci. Vzhledem k tomu, že testování *in situ* je často zdlouhavé, nákladné a v jisté míře i nepřesné, pomáháme si v mnoha případech laboratorními modely nebo virtuálními simulacemi. Právě ony jsou díky rychlému nárůstu dostupnosti výpočetního výkonu stále populárnější.

Pro potřeby simulace chování fotovoltaických systémů (a obecně všech elektronických obvodů) je k dispozici celá řada softwarů postavených na algoritmech SPICE, vyvinutých v 70. letech v Berkeley – mezi jinými například *LTspice*, který byl použit pro tuto práci.

O co v takové simulaci jde? Podle fyzikální teorie se vytvoří výpočetní počítačový model, na němž jsou simulovány různé provozní stavy stringu modulů a je sledována jejich reakce na výstupní charakteristiky. Takový model nám, je-li nastaven správně, může posloužit nejen pro simulace již známých stavů, ale také pomoci předcházet poruchám. V modelu je možno nastavit i extrémní hodnoty na vstupech a kontrolovat (měřit) tak více hodnot než při laboratorních pokusech. Rychle a účinně lze sondovat elektrické veličiny na libovolném obvodovém prvku v rámci schématu.

Tato práce se zabývá poruchami fotovoltaických modulů a jejich vlivem na výkon stringu. Porucha na jednom článku/modulu je svým chováním v podstatě ekvivalentem k jeho zastínění. Proto je pomocí zastínění možné poruchu efektivně simulovat. Konkrétně se v práci zaměřuji na sledování vlivu zastínění na změnu fázových proudů vstupujících do střídače a interpretace naměřených hodnot. Analýzou těchto měření hodnotím, při jaké míře poškození je vhodné vyměnit zastíněné (tedy poškozené) modul/y.

Kromě toho je prací ověřena korelace simulace s měřením na skutečné fotovoltaické elektrárně, aby se předešlo nesprávné interpretaci vypočtených hodnot.

1. Teoretická část

Fotovoltaické (PV) elektrárny se staly jedním z nejdůležitějších obnovitelných zdrojů elektrické energie. Ke konci roku 2018 dosáhl kumulativní celosvětově instalovaný výkon přibližně 500 GW, což představuje pokrytí zhruba 2% světové spotřeby. [1]

V tabulce níže jsou vypsány meziroční přírůstky instalované kapacity deseti nejproduktivnějších států, mezi lety 2017 a 2018. Čína, která v roce 2018 snížila meziroční přírůstek instalovaného výkonu z 53 GW na 45 GW, stále zůstává leaderem s celkovým výkonem 176,1 GW. Významný růst FV trhu vedl k podstatnému snížení ceny FV modulů. Deset největších producentů zároveň představuje 87% světové produkce. Ke konci roku 2018 mělo nejméně 32 států instalovaný výkon v FV elektrárnách vyšší než 1 GW.

Tabulka 1.1 - 10 států s největším přírůstkem instalované kapacity FV elektráren za roky 2017-2018 [1]

Pořadí	Země	Instalovaný výkon
1	Čína	45 GW
2	Indie	10,8 GW
3	USA	10,6 GW
4	Japonsko	6,5 GW
5	Austrálie	3,8 GW
6	Německo	3 GW
7	Mexiko	2,7 GW
8	Jižní Korea	2,0 GW
9	Turecko	1,6 GW
10	Nizozemí	1,5 GW

Nezbytnou součástí fotovoltaických elektráren je systém protekce, detekce a analýzy chyb, který slouží k zabránění vzniku neočekávaných událostí. Přestože systém pozbývá pohyblivých částí a je poměrně nenáročný na údržbu, stále je předmětem různých poruch, které se typicky vyskytnou se stárnutím systému. Například vady modulů, kabelového vedení, či proprietární elektroniky.

FV systémy jsou škálovatelnou a modulární technologií. Systémy lze stavět v libovolné velikosti od malých domovních instalací, po rozsáhlé elektrárny. Ve světě, a zejména v západních zemích, dochází v posledních letech k rapidnímu nárůstu malých domovních instalací. V momentě, kdy jsou moduly elektricky propojeny, může jakákoliv diskrétní porucha (jednoho modulu) ovlivnit výkon celého systému.

Ve velkých FV instalacích může být efektivní detekce chyb poměrně složitá. Případná chyba tedy může zůstat dlouho skryta a výrazněji se neprojevit až do selhání celého systému.

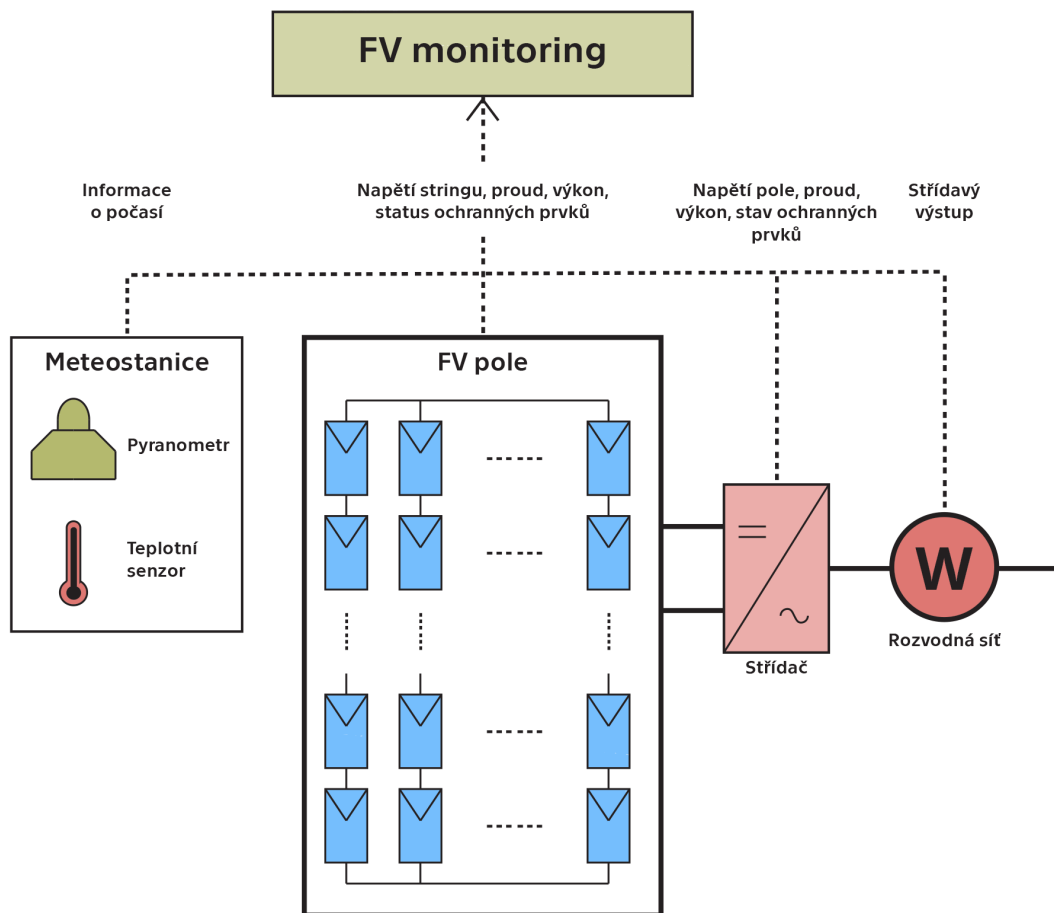
V důsledku závad vyskytujících se na FVE bylo v minulosti nahlášeno již mnoho požárů. Například 5. dubna 2009, kdy byl zpozorován kouř stoupající ze střechy obchodu v americkém Bakersfieldu, CA, kde byla umístěna 383 kW instalace. [2] Příčinou požáru se po vyšetřování ukázaly být střídače, které, v případě zemní poruchy, zvednou zemní vodič. V praxi je tento postup v pořádku v případě, že eliminuje jedinou zpětnou cestu proudu vzniklého v důsledku zemního spojení. Pokud však existuje v obvodu jiná cesta k uzemnění, 30 kW pole je skrz ni schopno dodat cca 100 Ampérů proudu, což je dostatečná hodnota na roztavení použitého vodiče.



Obrázek 1.1 - Výsledek požáru 383 kW FVE, Bakersfield, CA, USA 2009
[2]

V současné době dochází díky rostoucí instalované kapacitě FV systémů k nárůstu počtu měničů, monitorovacích systémů, komunikačního vybavení a ochranných prvků soustavy. Výsledkem je sběr velkého množství dat (okamžitých i historických hodnot). [3]

Obrázek 1.2 ukazuje příklad typického FV systému, připojeného na rozvodnou síť. Probíhá zde sběr dat z meteostanice, FV stringů, střídačů a rozvodné sítě. Data jsou použita především k vyhodnocení stavu FV systému a jeho výkonu. Vypočítávají se pomocí nich energetické ztráty za dlouhá časová období.



Obrázek 1.2 - Sběr dat ze sensorů umístěných na FVE. [3]

1.1. Princip funkce FV článku

Fyzikálním základem, vysvětlujícím funkci fotovoltaického článku je fotoelektrický jev¹, který popisuje mechanismus, při němž dochází k přenosu energie mezi fotonem dopadajícího záření a elektronem. Při dopadu záření na materiál může tak dojít k emisi elektronu. Každá látka vyžaduje k emisi elektronů specifickou vlnovou délku dopadajícího záření. Dokud není této kritické frekvence (energie fotonů) dosaženo, nebudou se, nezávisle na intenzitě záření, elektrony uvolňovat.²

U FV článku je zásadní, aby uvolněné elektrony neopustily jeho povrch. Ve většině materiálů dochází k okamžité zpětné rekombinaci s iontem. Jedinými použitelnými materiály pro výrobu článků jsou ty, kde je možné této okamžité rekombinaci zamezit. Polovodiče jsou proto pro tuto aplikaci ideální.

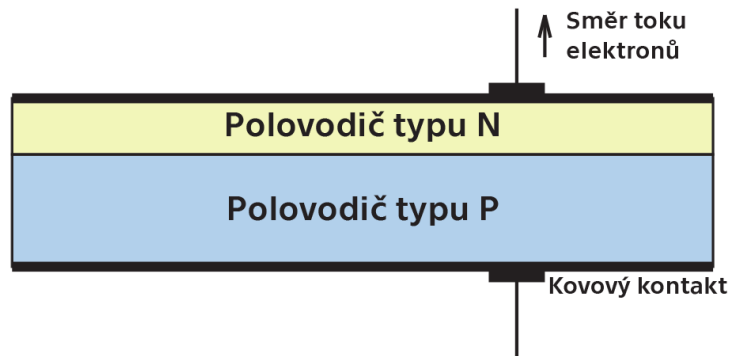
U polovodičů jsou valenční pás a vodivostní pás odděleny typicky potenciálem cca 1 Volt, což umožňuje dopadajícímu záření o energii cca 1 eV (elektronvolt) excitovat elektron z valenčního pásu do pásu vodivostního. Ve vodivostním pásu se může elektron volně pohybovat. Pokud je zamezeno jeho rekombinaci, může před svým návratem odevzdat energii v externím obvodu.

Rekombinaci se u polovodičů předchází přidáváním příměsí (tzv. dopování). Dopovaný křemík je získáván v peci za přítomnosti křemíkových par, které jsou smíchány s akceptory (typ P) nebo donory (typ N) k výrobě příslušných vrstev. Části P i N vrstev jsou dotovány více, tudíž se sníží jejich energie k překonání valenčního pásu. Dva dopované polovodiče jsou poté spojeny a zformují P-N přechod.

Fotovoltaický článek je v principu P-N přechod s centrální hradlovou vrstvou a dvěma krajními kvazineutralními zónami. Z vnější strany každé vrstvy je připojen vodič. Vrstva dotovaná elektrony (typu N), se nazývá emiter, druhá vrstva (typu P) se nazývá báze. Báze je též nazývána absorpční oblast, protože je v ní pohlcena většina dopadajícího záření. Na rozdíl od diody je FV článek navržen tak, aby generoval vlivem záření páry elektron-díra uvnitř přechodu. Proud P-N přechodem může téct jen jedním směrem. Proto pokud jedna z vrstev P-N přechodu dopadem záření generuje elektrický proud, je tento proud nucen protéci obvodem, aby mohl na druhé straně přechodu rekombinovat.

¹ Albert Einstein za jeho vysvětlení dostal v roce 1921 Nobelovu cenu za fyziku.

² Vychází z kvantové povahy částic. Elektron potřebuje k uvolnění z valenční vrstvy určitou minimální ionizační energii.



Obrázek 1.3 - Základní schéma zapojení fotovoltaického článku typu P.

Celkový generovaný proud článku je pak vyjádřen rovnicí:

$$I = S[J_p(x) + J_n(x)] \quad (1)$$

kde

- S je plocha článku,
- J_p je hustota el. proudu vlivem děr,
- J_n je hustota el. proudu vlivem elektronů.

Napětí naprázdno (U_{oc}) FV článku je dáno elektrickým polem vytvořeným v depleční vrstvě P-N přechodu, které je téměř nezávislé na slunečním ozáření. [4] Ideální fotovoltaický článek je poté popsán rovnicí:

$$I = I_{fv} - I_0 \left[e^{\frac{U}{U_T}} - 1 \right] \quad (2)$$

kde I_{fv} je vzniklý proud, přímo úměrný solárnímu ozáření, I_0 je saturační proud diody, U je napětí mezi terminály FV článku a U_T je tepelné napětí popsané následující rovnicí:

$$U_T = \frac{k \cdot T}{q} \quad (3)$$

kde

- k je Boltzmannova konstanta ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K)
- T je termodynamická teplota
- q je elementární náboj elektronu ($1,602 \times 10^{-19}$ C).

Tepelné napětí U_T se při pokojové teplotě 300 K rovná 0,026 V. Dvě výše uvedené rovnice vedou na jednoduchý ekvivalentní obvod FVČ, který se modeluje jako zdroj proudu paralelně spojený s jednou, případně dvěma diodami.

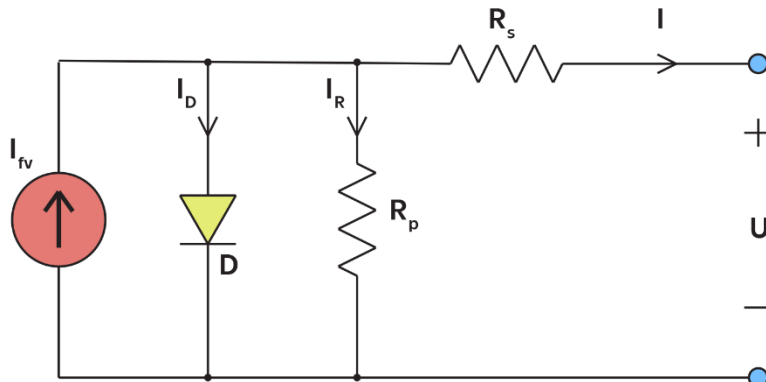
1.1.1. Model FV článku a rovnice základních sledovaných parametrů

Vzhledem k nelineární podstatě V-A charakteristik solárních článků je není vhodné modelovat jednoduše jako zdroj konstantního napětí nebo proudu. K modelování chování FV prvků jsou nejčastěji používány jednodiodový a dvoudiodový model, jejichž ekvivalentní obvody jsou popsány v následujících kapitolách.

1.1.1.1. Jednodiodový model

Jelikož se rozdíl mezi realitou a tímto modelem pohybuje v řádu několika málo procent [5], lze jej použít pro většinu aplikací. Pro jeho jednoduchost a flexibilitu při modelování různých pracovních módů je v teoretických pracích hojně využíván. Model sestává ze zdroje proudu, představující tok dopadajícího záření a paralelní diody. Obsahuje celkem 5 neznámých parametrů: I_{fv} , I_s , n , R_s a R_p . Ztráty představují dva odpory – paralelní a sériový.

Existují i jednodušší modely bez uvažování sériových a paralelních odporů. Jejich využitím jsou sice zjednodušeny výpočty, ale model poté obsahuje poměrně značné chyby při simulaci nestandardních podmínek, jako je částečné poškození, či vyšší teplota. Z těchto důvodů byl v práci použit model zahrnující oba odpory.



Obrázek 1.4 - jednodiodový model FVČ. [6]

Rovnici modelu lze odvodit přímo za použití Kirchhoffova zákona [6]:

$$I = I_{fv} - I_d - I_R \quad (4)$$

kde proud diodou je

$$I_d = I_s \left(e^{\frac{q(U+I \cdot R_s)}{n \cdot k \cdot T}} - 1 \right) \quad (5)$$

a proud paralelní větvi je

$$I_p = \left(\frac{U + I \cdot R_S}{R_p} \right) \quad (6)$$

Kombinací rovnic (4), (5) a (6) poté dostaneme jedinou rovnici popisující jedno-diodový model:

$$I = I_{fv} - I_s \left(e^{\frac{q(V+I \cdot R_S)}{n \cdot k \cdot T}} - 1 \right) - \left(\frac{U + I \cdot R_S}{R_p} \right) \quad (7)$$

kde

I	generovaný proud [A]
I_s	saturační proud diody [A]
T	teplota [K]
n	faktor ideality ³ [-]
q	Elementární elektrický náboj [$1,602 \cdot 10^{-19}\text{C}$]
U	napětí článku [V]
I_{fv}	fotoproud [A]
R_s	sériový odpor článku [Ω]
R_p	paralelní odpor článku [Ω]

V případě, že dojde k zastínění článku, jeho sériový odpor se zvýší. Paralelní odpor se chová přesně opačně. [7] Z toho vyplývá, že v případě postupu stínu přes plochu článku dojde ke zvyšování svodového proudu a poklesu napětí na kontaktech. Při zastínění se tedy poklesem R_p zvyšuje riziko vzniku hot-spotů (článek pracuje jako zátěž).

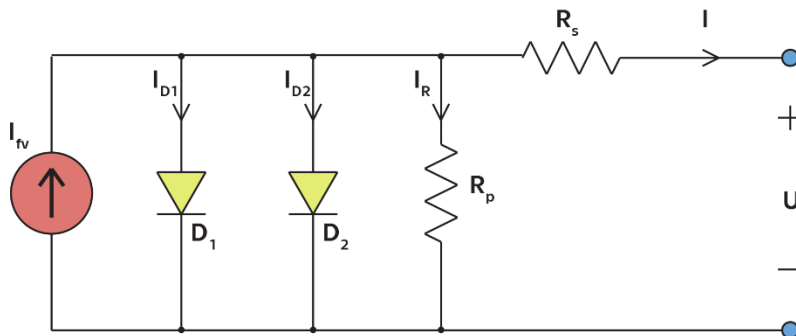
Největší příspěvek k redukci výstupního výkonu v důsledku stínění je způsoben změnou sériového odporu. Výkon disipovaný vlivem zvýšení R_s může přesahovat 50 % [7] celkového výkonu na výstupu FV modulu. Sériový odpor R_s reálného článku je v řádu miliohmů ($\text{m}\Omega$), hodnota paralelního odporu R_p se obvykle pohybuje okolo 500-1000 Ω .

1.1.1.2. Dvoudiodový model

Model se dvěma diodami je znázorněn na obrázku níže, kde paralelní odpor R_p představuje ztráty vlivem mikrosvodů p-n přechodu (dioda D) a svodové poruchy článku. Sériový odpor R_s vyjadřuje vliv odporu proudových sběrnic a materiálu, I_{FV} reprezentuje proud generovaný dopadajícím zářením. První dioda ve schématu modeluje difusní proud,

³ Nabývá typicky hodnot od 1 do 2. Jde o veličinu, která popisuje, jak moc se blíží charakteristika diody Shockleyho rovnici ideální diody $I = I_s \left(e^{\frac{U_D}{n U_T}} - 1 \right)$.

druhá rekombinační proudy. Dle Shockleyho difusní rovnice můžeme tedy nastavit v rovnici (8) pro první diodu faktor ideality $n = 1$ a pro druhou $m = 2$.



Obrázek 1.5 - Dvoudiodový model FVČ [8]

Rovnice pro dvou-diodový model:

$$I = A_{ill} \cdot J_{PV} - I_{D1} \left[\exp \left(e \frac{U + R_s \cdot I}{n \cdot k \cdot T} - 1 \right) \right] - I_{D2} \left[\exp \left(e \frac{U + R_s \cdot I}{m \cdot k \cdot T} - 1 \right) \right] - \frac{U + R_s \cdot I}{R_p}$$

(8)

kde

I	generovaný proud [A]
A_{ill}	velikost ozářené oblasti [m^2]
J_{PF}	proudová hustota zdroje proudu [$\frac{A}{m^2}$]
U	napětí na svorkách článku [V]
e	elementární elektrický náboj $1,602 \cdot 10^{-19}$ [C]
k	Bolzmannova konstanta $1,3806 \cdot 10^{-23}$ [$\frac{J}{K}$]
n, m	faktory ideality diody [-]
T	teplota přechodu [K]
R_s	sériový odpor článku [Ω]
R_p	paralelní odpor článku [Ω]
I_{D1}	saturační proud diody D_1 (rekombinace v kvazineutrálních oblastech) [A]
I_{D2}	saturační proud diody D_2 (rekombinace v oblasti prostorového náboje) [A]

1.1.1.3. Základní sledované parametry

Fill Factor – Parametr, který určuje poměr maximálního dosaženého výkonu s ideálním maximem pro daný článek. Udává, míru shody/velikost odchylky měřené charakteristiky vůči charakteristice „obdélníkového“ tvaru.

$$FF = \frac{I_{mpp} \cdot U_{mpp}}{I_{SC} \cdot U_{OC}} \quad (9)$$

I_{mpp}	proud v bodě max. výkonu [A]
U_{mpp}	napětí v bodě max. výkonu [V]
I_{SC}	proud nakrátko [A]
U_{OC}	napětí naprázdno [V]

MPP – Bod maximálního výkonu. Spočte se jednoduše vynásobením I_{mpp} a U_{mpp} .

Účinnost článku – celková elektrická účinnost FV článku je definována jako poměr mezi generovanou elektrickou energií (P) a intenzitě záření (G_x) dopadajícího na povrch článku vynásobené plochou článku (A_{ill}).

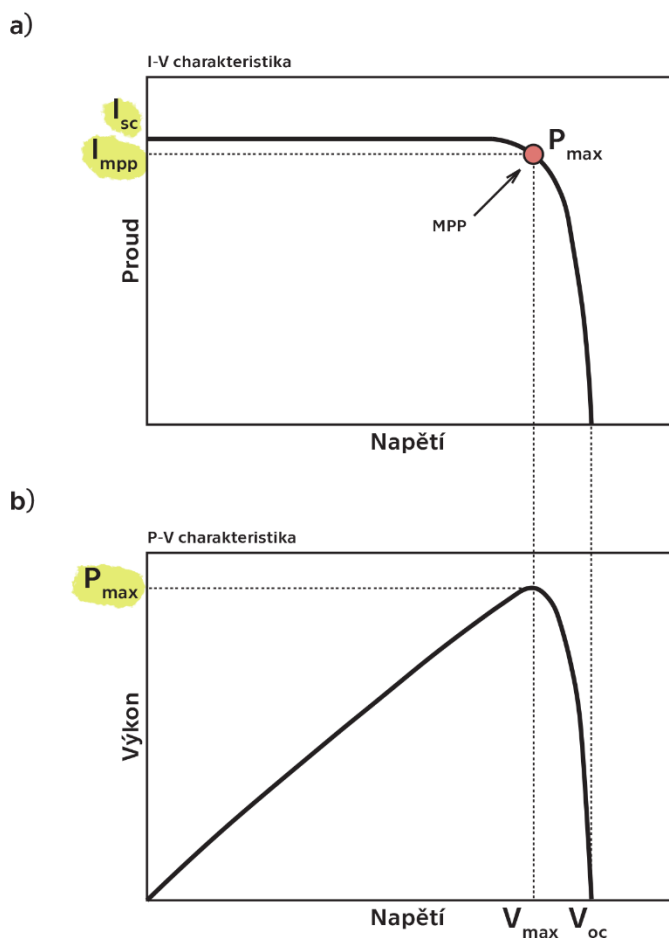
$$\eta_{\text{čl}} = \frac{P}{E_x \cdot A_{ill}} = \frac{P}{P_{dop}} \quad (10)$$

P	energie přeměněná na el. energii [W]
P_{dop}	energie dopadajícího záření [W]
E_x	intenzita dopadajícího záření [$\frac{W}{m^2}$]
A_{ill}	ozářená plocha [m^2]

1.1.2. V-A charakteristika

K analýze fotovoltaických prvků se běžně používají dvě křivky, které představují charakteristiku závislosti napětí na proudu a na výkonu. Křivka proudu a napětí (V-A) představuje všechny možné provozní body proud-napětí pro FV prvek. Podobně zobrazuje všechny možné provozní body křivka výkon-napětí (P-V).

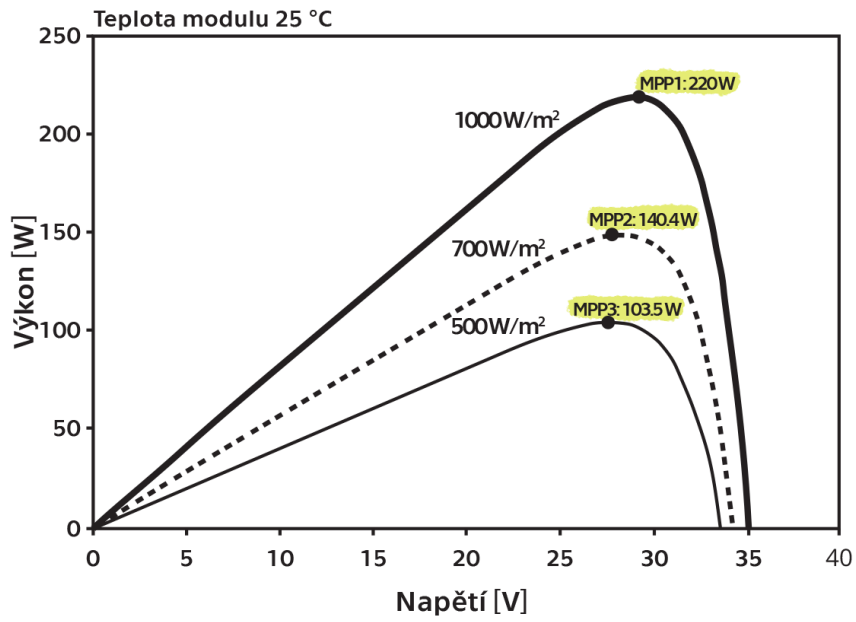
Obrázek 1.6 znázorňuje teoretické výstupní křivky FV článku. Maximum proudu je rovno I_{SC} a maximum napětí V_{OC} . "Kolena", jak V-A, tak P-V charakteristiky reprezentují bod maximálního výkonu (MPP), kterého lze dosáhnout zvolením ideální hodnoty připojené zátěže.



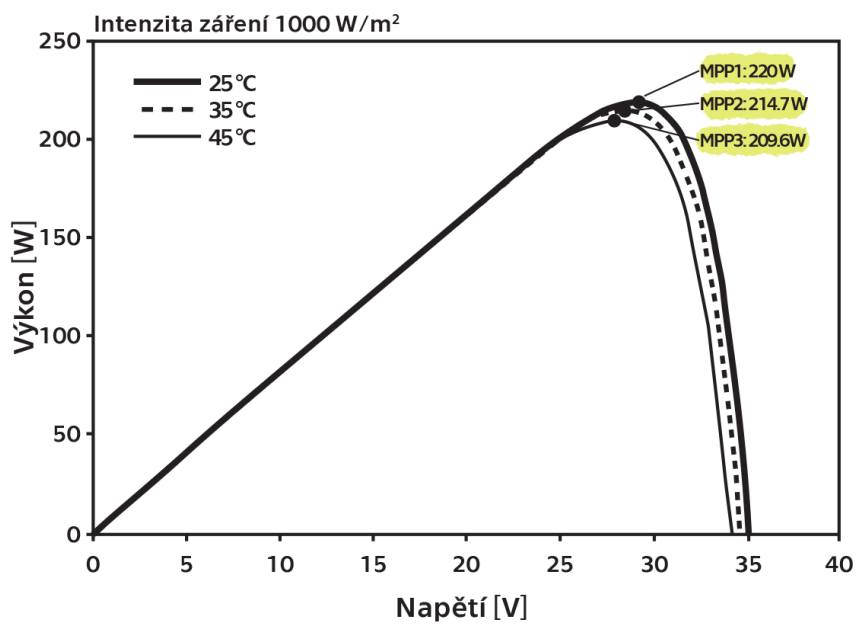
Obrázek 1.6 - a) V-A charakteristika ideálního FV článku a b) ideální P-V charakteristika FV článku.

V-A a P-V charakteristiky FV modulu jsou při normálním provozu závislé na jejich ozáření a na teplotě. Obrázek 1.7 a obrázek 1.8 popisují chování FV modulu při různých hodnotách intenzity dopadajícího záření G a stálé teplotě 25°C . S poklesem dopadajícího zářivého výkonu se snižuje i generovaný elektrický výkon. V obrázku jsou znázorněny tři body MPP1, MPP2 a MPP3, při různých úrovních ozáření: 1000 W/m^2 , 700 W/m^2 a 500 W/m^2 . První křivka v grafu (MPP1) znázorňuje tzv. standardní testovací podmínky (STC), při kterých jsou měřeny a porovnávány parametry všech vyrobených modulů. STC pro FV definuje norma IEEE 1526-2003.

Na dalším obrázku je znázorněno chování modulu při změně teploty (T) a stálé hodnotě ozáření. Se zvyšováním teploty modulu klesá jak výstupní napětí, tak proud, v důsledku čehož poklesne také výkon. Na obrázku 1.8 jsou pro ilustraci vyhodnoceny a porovnány křivky pro 3 různé teplotní úrovně. Hodnota G je fixována na 1000 W/m^2 . Nejlepších výsledků dosahuje modul při nejnižší zvolené teplotě ($T = 25^{\circ}\text{C}$).



Obrázek 1.7 - P-V křivka při změně intenzity dopadajícího záření.



Obrázek 1.8 - P-V křivka při změně teploty.

Proud tekoucí skrz FVČ při nulovém napětí (I_{SC}) lze při použití jednodiodového modelu (viz kapitola 1.1.1.1) spočítat dle následující rovnice:

$$I_{SC} = I_{fv} - I_s \left(e^{\frac{q(V+I \cdot R_S)}{n \cdot k \cdot T}} - 1 \right) - \left(\frac{I_{SC} \cdot R_S}{R_p} \right) \quad (11)$$

Zkratový proud I_{SC} a proud generovaný dopadajícím zářením I_l , či I_{FV} můžeme považovat u ideálního FVČ za identické.

Dalším z parametrů na charakteristice je napětí naprázdno U_{OC} . Jedná se o nejvyšší možné napětí na výstupních terminálech, při odpojení zátěže. Při položení hodnoty $I = 0$ A v rovnici (7) lze jeho hodnotu nalézt jako:

$$U_{OC} = \frac{n \cdot k \cdot T}{q} \cdot \ln \left(\frac{I_{fv}}{I_s} + 1 \right) \quad (12)$$

Saturační proud diody I_s je v modelu závislý na rekombinačních procesech v rámci FVČ. Pokud známe všechny ostatní parametry, saturační proud se vypočte za použití předchozí rovnice (12).

$$I_s = \frac{I_{SC} - \frac{U_{OC}}{R_p}}{e^{\frac{q \cdot U_{OC}}{n \cdot k \cdot T}} - 1} \quad (13)$$

Se zvyšující se intenzitou dopadajícího záření roste lineárně i hodnota proudu nakrátko I_{SC} (Obrázek 1.8). Proud je méně významně ovlivněn i teplotou článku. Obojí zahrnuje následující rovnice:

$$(I_{SC})_{G,T} = (I_{SC})_{STC} \cdot (1 + \alpha_{rel} \cdot (T - T_{STC})) \cdot \frac{(G)_{G,T}}{G_{STC}} \quad (14)$$

kde α_{rel} je koeficient určující vztah mezi proudem a teplotou.

V případě potřeby modelování vlivu teploty na tvar V-A charakteristiky a tím způsobený posuv bodu napětí naprázdno U_{OC} (Obrázek 1.7) je vhodné použít následující rovnici:

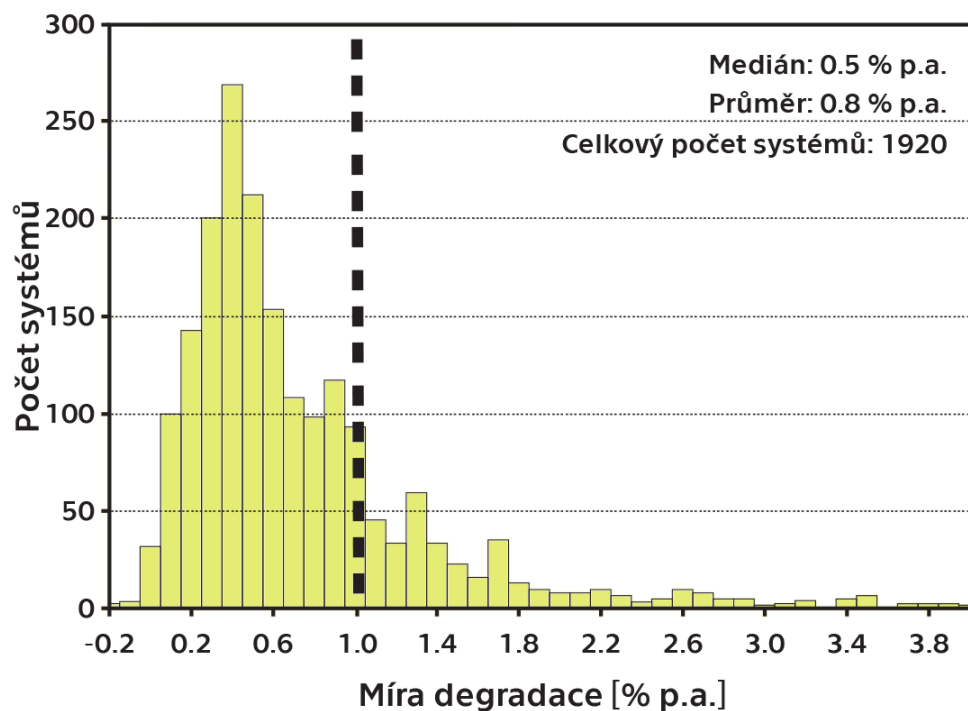
$$(U_{OC})_T = (U_{OC})_{STC} \cdot (1 + \beta_{rel} \cdot (T - T_{STC})) \quad (15)$$

kde β_{rel} je koeficient určující vztah mezi napětím a teplotou.

1.2. Časová degradace modulů

FV moduly se skládají z výhradně nepohyblivých částí. Z toho důvodu je míra jejich degradace v čase závislá především na stabilitě použitých materiálů a jejich odolnosti vůči žívlům. Typická záruka na moderní moduly udávaná výrobcí se pohybuje okolo 20 let. Většina degradačních defektů, ovlivňující negativně výkon FV systému vzniká příčinou vniku vody do modulu a teplotnímu namáhání. Degradace může probíhat postupně, téměř lineárním meziročním snižováním výkonu, či skokově, selháním jednoho, nebo více článků.

V rámci studie americké laboratoře NREL z roku 2012 [9] byla během 40 let shromážděna data z 1920 systémů užívajících c-Si technologii, přičemž průměrná roční míra degradace, je zobrazena na následujícím grafu:



Obrázek 1.9 - Histogram míry degradace systémů s Si moduly. [9]

Až 78 % analyzovaných systémů nevykazovalo větší míru degradace než 1% p.a., přičemž medián měl hodnotu 0,5% p.a.. Také lze obecně tvrdit, že se u novějších systémů míra degradace materiálů podstatně snížila.

1.3. Defekty fotovoltaických modulů

FV systémy podléhají různým poruchám. Mezi nejčastější patří snížení výkonu FVE vzniklé vlivem částečného zastínění, porucha jednotky sledující bod maximálního výkonu, hot spoty a mikro praskliny křemíkových článků.

Fotovoltaická elektrárna je typicky tvořena několika paralelními stringy. Každý string sestává z několika modulů zapojených v sérii. Každý modul, string i celá sestava mají svou vlastní unikátní V-A charakteristiku a bod maximálního výkonu (MPP). Po elektrickém propojení modulů je jejich společná V-A charakteristika dána jejich vzájemnou interakcí. Lze proto říci, že fotovoltaická elektrárna/string je limitován, nejslabším stringem/modulem v řetězci. [10] To platí i pro FVE v případě poruchových stavů.

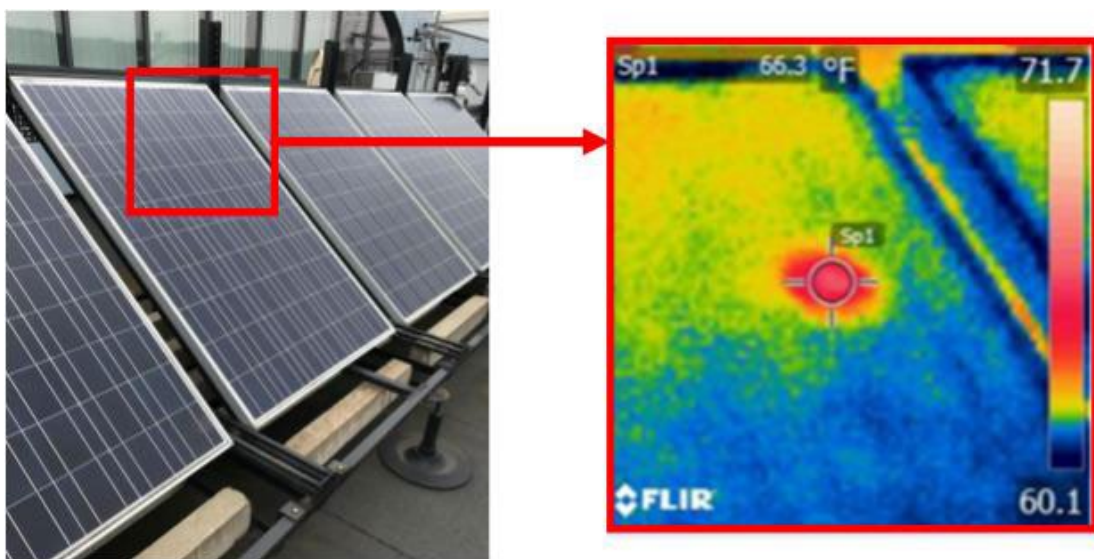
Poruchové stavy ve FVE poškozují jak moduly, tak elektrické spoje mezi nimi a mohou vést až k požáru či úrazu elektrickým proudem. Kromě toho mohou vést poruchové stavy na značnou ztrátu v generovaném výkonu. Jako příklad lze uvést Britskou studii z roku 2016, dle které se pohybují roční ztráty v generování energie na domovních FV systémech vlivem neřešených poruch mezi 3,4 - 18,9%. [11] Proto je pro správnou funkci a spolehlivost systému detekce těchto poruchových stavů velmi důležitá. V literatuře bylo k tématu diagnostiky FV systémů navrženo již mnoho analytických postupů. [11]

Jelikož se některé z elektrických poruch, jako například nesoulad („mismatch“) parametrů modulů ve stringu, vyskytují v poli instalovaných modulů po celou dobu provozu, vedou k tomu, že elektrárna generuje stejnosměrný proud výrazně pod hodnotou, jeho nominální úrovně. V tabulce 2 je souhrn druhů poruch FV instalací.

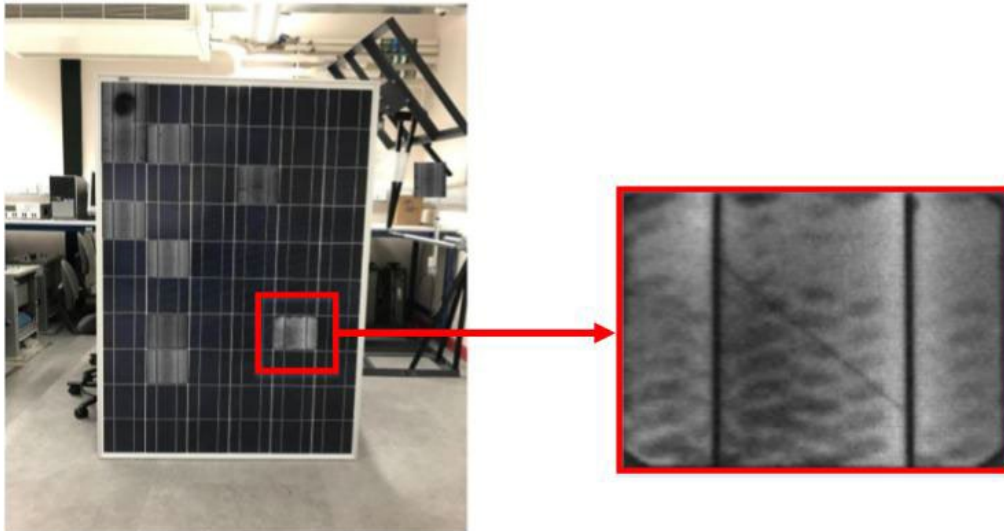
Častými poruchami způsobujícími, že moduly neoperují v maximu MPP jsou mikro praskliny v povrchové struktuře křemíku (Obrázek 1.11) a vadné články, způsobující hot spoty (Obrázek 1.9).

Tabulka 1.2 - Typy poruch na FV instalacích

Oblast výskytu	Typ defektu	Popis
DC	Částečné zastínění	Přítomnost stromů, nadzemního elektrického vedení, či blízkých staveb
	Rovnoměrné rozložení ozáření	Proměnná intenzita ozáření během dne
	Znečištění	Nečistoty, jak organického (ptačí trus), tak anorganického (zemina) původu
	Hot spot	Způsobuje velký nárůst teploty poškozeného článku
	Zemní spojení na konci stringu	Zemní spojení s nulovou impedancí nastane mezi posledními dvěma moduly ve stringu
	Zemní spojení jinde ve stringu	Zemní spojení nastane v jiné části stringu, což vede na velké zpětné proudy
	Spojení fází	Zkrat mezi dvěma body ve stringu s rozdílnými potenciály
	Porucha bypass diody	Zkrat v případě chybného zapojení
	Degradace	Zažloutnutí, či zahnědnutí modulu, delaminace, bublinky v krycí vrstvě modulu, prasklé články, defekty antireflexní vrstvy, delaminace nad články a spoji vedou k degradaci a zvýšení sériového odporu modulu.
	Paralelní výboj	Selhání izolace mezi vodiči
	Sériový výboj	Výboj vzniklý přerušením vodiče, například vlivem přerušení v místě pájených spojů, poškození článku, koroze konektorů, poškození zvěří či abraze
	Porucha MPPT trackingu	Problém s MPPT regulátory
AC	Porucha střídače	Selhání některého komponentu střídače, jako IGBT, kapacitorů nebo řídicí elektroniky
	Přírodní katastrofy	Celkový výpadek (např. zasažení bleskem)

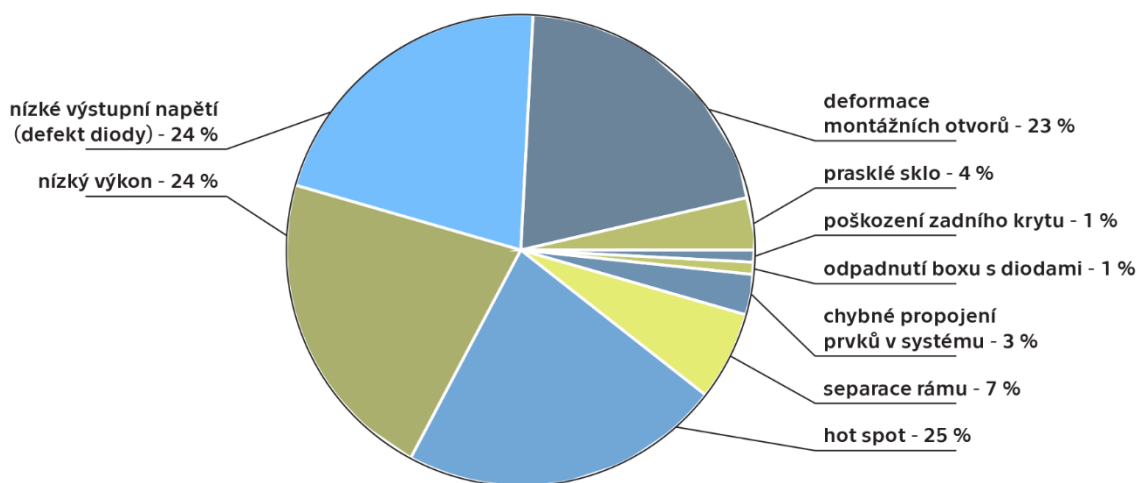


Obrázek 1.10 - Hot spot na FV článku [12]



Obrázek 1.11 - Mikro prasklina FV článku [13]

V rámci odborné studie, prováděné v roce 2017 na 200 MW_p fotovoltaické elektrárně v USA [14], jež byla v provozu 3 roky, byly provedeny testy všech modulů s cílem analyzovat míru degradace, poruchy a určit jejich příčinu. Celkem bylo v rámci studie identifikováno 115 defektních modulů. Rozložení poruch graficky znázorňuje následující graf (Obrázek 1.7).

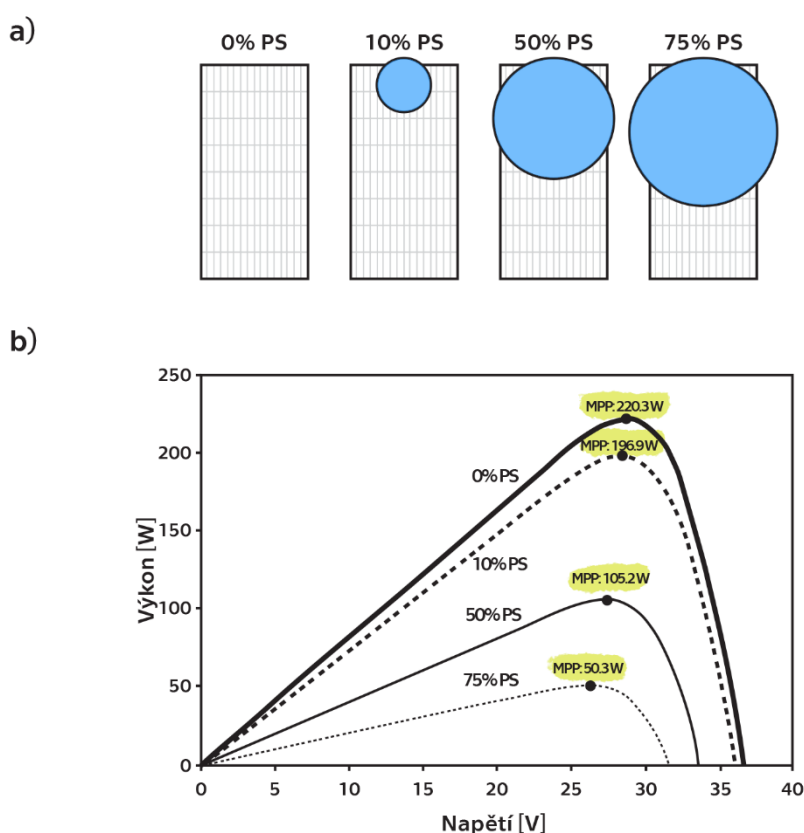


Obrázek 1.12 - Procentuální zastoupení poruch vzniklých na FV modulech po 3 letech provozu [14]

1.3.1. Částečné zastínění

K částečnému zastínění v FV systému dochází z několika důvodů. Typicky se jedná o zastínění nedalekými stromy, pohybem oblačnosti⁴ nebo znečištěním povrchu modulů prachem či sněhem. Stav zastínění způsobuje výkonové ztráty, vznik hot spotů a snižuje bezpečnost a spolehlivost systému. [15]

Obrázek 1.13 ilustruje efekt částečného zastínění na FV modul na teoretické P-V charakteristice. Z křivky je patrné, že je hodnota výkonu MPP přímo úměrná zakrytí modulu. Například, při zastínění 10 % plochy modulu dojde k poklesu výkonu o 10,6 %. Při zastínění ze 75 % poklesne výkon o 77,2 %. [16]



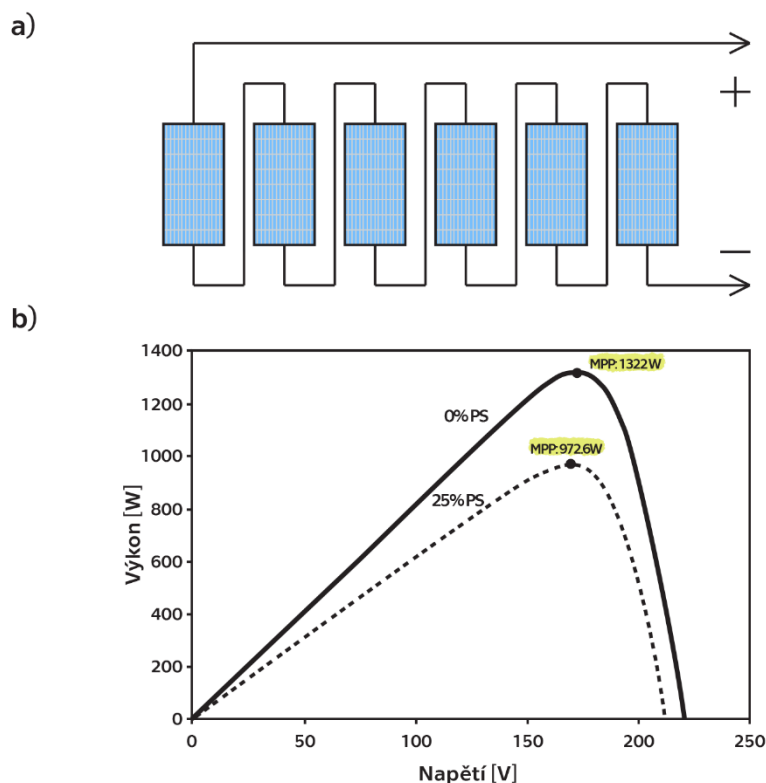
Obrázek 1.13 - a) Procentuální zakrytí FV modulu, b) P-V charakteristika pro každou výše ilustrovanou situaci (bez bypass diod)

U menších, domovních instalací jsou typicky moduly propojeny do série. [17] Dopad částečného zastínění na string 6 modulů zapojených do série je patrný na příkladu na následujícím obrázku 1.14, simulovaným pomocí softwaru LTspice za standardních testovacích podmínek. [18] Pokles

⁴ Projevuje se zejména u rozlehlých FVE, kde má za následek pokles účinnosti a může vést na lokální ohřev modulů.

výkonu je opět dle předpokladu přímo úměrný zastíněné ploše. Poklesu výkonu se při částečném zastínění v praxi zamezuje následujícími třemi způsoby:

- Použití několika bypass diod u každého modulu
- Sério-paralelní zapojení modulů a inteligentní přepínání mezi větvemi⁵ [19]
- Pokročilé algoritmy MPP trackingu



Obrázek 1.14 - a) String 6 do série zapojených modulů, b) Efekt 25% zastínění, uniformně na každém modulu

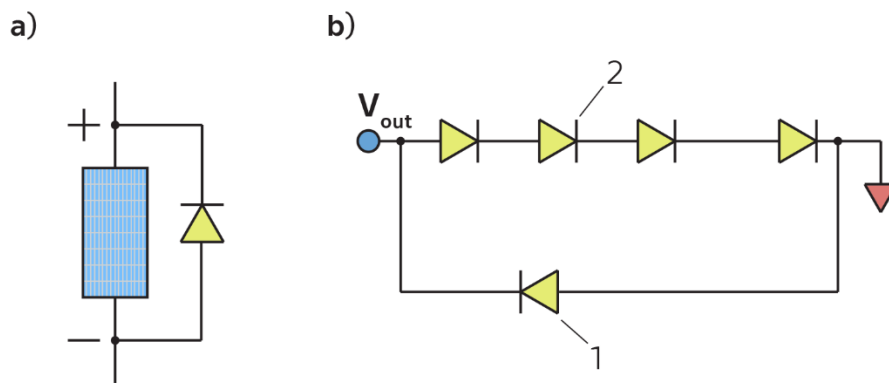
1.3.1.1. Zlepšení parametrů použitím bypass diod

Vliv částečného zastínění může být do určité míry redukován a tím zvýšen výstupní výkon systému použitím bypass diod. Bypass diody se připojují paralelně s každým modulem i částí modulu s opačnou polaritou. Viz obrázek 1.15. Při normálním provozu je článek polarizován v propustném směru a bypass diodou neteče žádný proud. Pokud je ovšem článek polarizován závěrně, například vlivem stínění, bypass dioda otevře a tím umožní průchod proudu z nezastíněných článků skrz externí obvod.

⁵ Tzv. TCT – Total Cross-Tied konfigurace. Vyznačuje se vyšší tolerancí k prostředí instalace.

Tento systém ochrany FV modulů byl patentován v USA v roce 1984. [20] Patent popisuje značné zlepšení výkonu článků vybavených zpětně polarizovanými diodami při částečném zastínění. V roce 1988 byl poprvé vyroben FV článek zahrnující monolitickou bypass diodu formou přidání vrstvy polovodičového materiálu. [21] V roce 2002 si německý vědec R. Müller nechal patentovat výrobní proces, při němž je na zadní, temnou stranu každého článku integrována bypass dioda. [22]

První modul s integrovanými bypass diodami byl vyvinut a patentován až v roce 1997. [23] Ke každému FV článku byla anti-paralelně připojena bypass dioda. V obrázku 1.15 je znázorněno schéma zapojení. Dioda (a) je v případě ozáření článku (b) závěrně polarizována. U bypass diod je kvůli minimalizaci ztrát při nominální operaci článku žádoucí co nejnižší závěrný proud.



Obrázek 1.15 - a) Bypass dioda zapojená paralelně s FV článkem, b) Série FV článků spojená anti paralelně s bypass diodou [23]

V dnešní době výrobci FV modulů integrují několik⁶ bypass diod, čímž vytvoří na modulu substringy článků, jak je ukázáno na obrázku 1.17. Na obrázku 1.16a je vidět typický modul, na jehož zadní straně se nachází v plastovém krytu 3 bypass diody (Obrázek 1.16b).

⁶ Typicky se používají 3 Schottkyho bypass diody na modul.

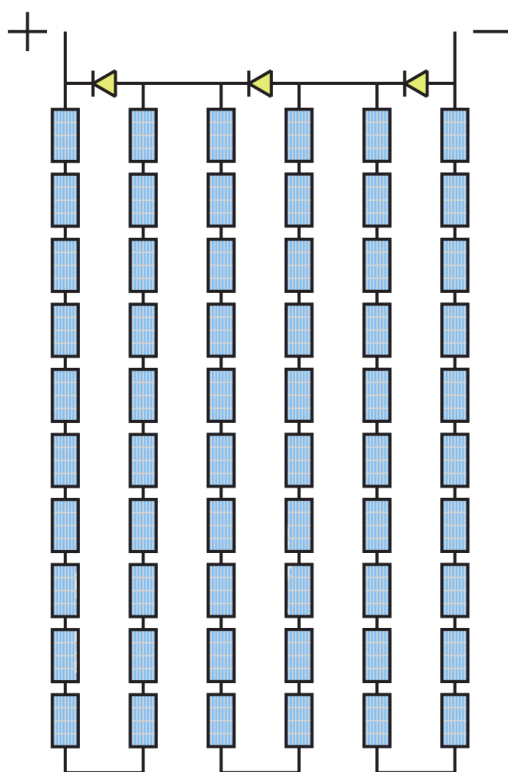


a



b

Obrázek 1.16 - a) Typický 60-článekový FV modul, b) Rozvodná krabice s bypass diodami [24]



Obrázek 1.17 - Modul rozdělený diodami do tří substringů

Obvykle jsou diody připojeny paralelně ke stringu 15-24 článků. Z toho vyplývá, že je typický modul, který obsahuje 60-72 článků rozdělen na 3 sekce, jež budou přemostěny v případě propustné polarizace některé z diod. Propustně polarizovaná dioda se může vlivem velkých proudů značně zahřívat, což může vést na lokální ohřev modulu (hot spot). Lokální ohřev znamená vždy urychlení degradace jak diody, tak FV modulu. [24]

Významného zlepšení situace v případě zastínění, znečištění modulů, výrobními chybami a dalšími problémy tvořící rozdíl v energii generované jednotlivými články ve stringu, lze dosáhnout změnou topologie zapojení. A to buď aktivními, či pasivními rekonfiguračními mechanismy, zvýšením počtu bypass diod, či jejich kombinací, společně s využitím kontrolních algoritmů. [25] U domovních instalací je možno optimalizovat výkon mikro střídači, připojenými zvlášť ke každému modulu, nicméně na trhu je pouze malé množství produktů zabývajících se problematikou optimalizace výkonu. Optimalizace na úrovni modulu jsou kvůli závislosti výkonu stringu na nejslabším článku nejlepším technickým řešením.

I přes nedostatky stávajících architektur by mohlo být v rámci FV modulů použito několik strategií prezentovaných v literatuře pro zvýšení tolerance výkonového nesouladu článků. Jedním z příkladů je použití „inteligentních“ topologií, které mohou využít různé řídicí algoritmy k dynamickému rekonfigurování vnitřních obvodů solárního modulu (nesmí být zaměňovány s mikro-měniči a optimalizátory výkonu zabudovanými do modulu). Tyto struktury jsou zpravidla založeny na paralelních architekturách (křížová TCT nebo sériově paralelní SP), protože jsou mnohem odolnější vůči částečnému stínění.⁷

Pro lepší ilustraci dopadu částečného zastínění bez použití bypass diod a s nimi slouží obrázek 1.18 a obrázek 1.19. Obrázek 1.18 ukazuje výsledky simulace pro FV modul při STC⁸ a zastínění 30 % modulu. MPP modulu bez použití bypass diod se rovná 150,6 W. Po připojení tří bypass diod (a tím vytvoření tří substringů) vzroste výkon v MPP na 169,7 W. Obecně může vzniknout větší množství bodů max. výkonu, dle počtu připojených diod. Na obrázku 1.19 jsou vidět na P-V charakteristice dva body MPP - bod GMPP⁹ a LMPP¹⁰. Výsledným efektem je výstupní výkon modulu na hodnotě GMPP, z čehož vyplývá garance většího výkonového zisku oproti modulu bez diod. Pro optimální chod systému musí být modul s diodami vybaven MPP trackerem, který dokáže sledovat globální MPP.

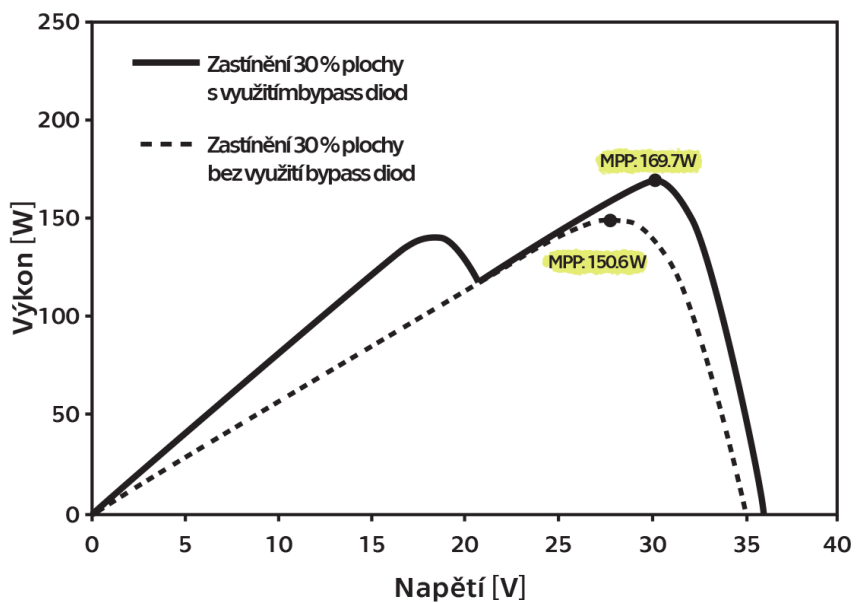
Při návrhu modulu je velmi důležitý správný návrh bypass diod (kolik článků přemostí). Při špatném návrhu mohou FVČ utrpět nenapravitelné škody. V měřených modulech je každá bypass dioda připojena antiparalelně ke 24 FVČ. Při praktickém připojování bypass diod pro přemostění n článků platí, že hodnota průrazného napětí závěrně polarizovaného FVČ musí být vyšší než $n+1$ krát 0,5 V. Dle tohoto pravidla by tedy mělo mít průrazné napětí bypass diod hodnotu 12 - 12,5 V, aby nedošlo k poškození solárních článků. Běžně mají diody průrazné napětí přibližně 10 V, vhodnějším řešením by tedy bylo, kdyby každá bypass dioda pokryla 18 až 20 FVČ.

⁷ Jak je zřejmé z Kirchhoffových zákonů proudu a napětí.

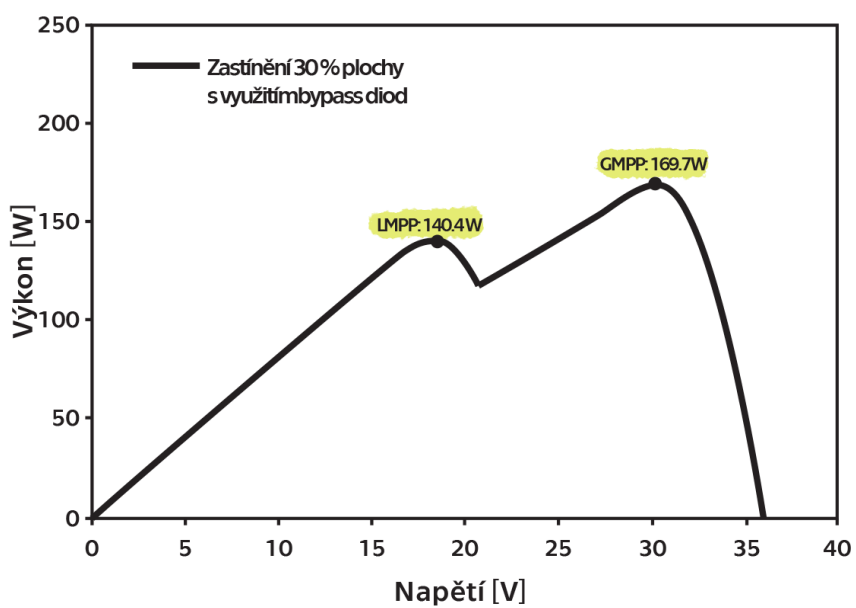
⁸ Standardní testovací podmínky – $T = 25\text{ °C}$, $G = 1000\text{ W/m}^2$, AM1,5

⁹ Globální MPP

¹⁰ Lokální MPP



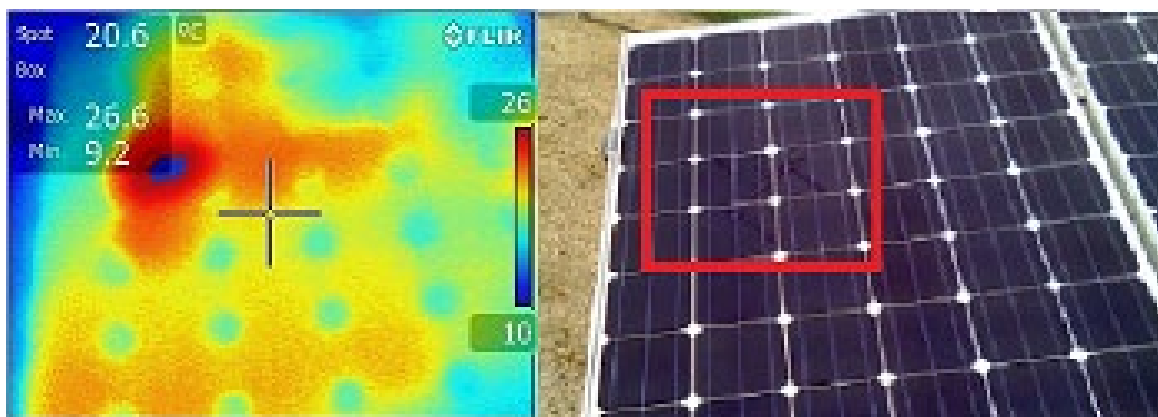
Obrázek 1.18 - Výsledky simulace při STC pro FV modul



Obrázek 1.19 - LMPP a GMPP pro 30% částečné zastínění se 3 bypass diodami připojenými k modulu

1.3.2. Hot spoty

Nedostatečná údržba FV systémů může způsobit vznik hot spotů vlivem naakumulovaných nečistot, stínící ozářenou stranu modulu, což způsobí trvalé energetické ztráty a pokles spolehlivosti. Hot spoty jsou dobře prozkoumaným jevem, poprvé popsáným již v roce 1969. [26]



Obrázek 1.20 - Fotografie horní části FV modulu (pravo), Fotografie modulu v IR oblasti, na níž je patrný hot spot způsobený poruchou daného FVČ (vlevo) [27]

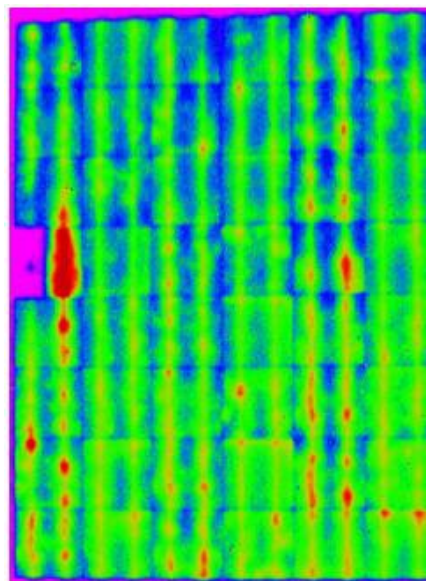
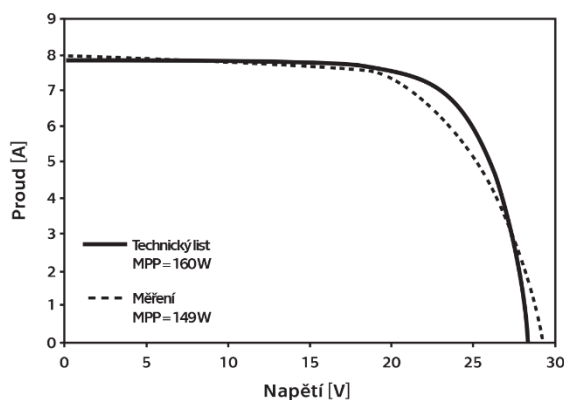
Ke vzniku hot spotu dojde pokud jsou články, nebo skupina článků závěrně polarizovány, důsledkem čehož místo generace disipují energii ve formě tepla. I když nedojde k poškození článku v řetězci, expozice vysokým teplotám zapříčiní zrychlení degradace materiálu modulu, v němž je článek zapouzdřen. [28] K detekci hot spotů v rámci FVE jsou v praxi hojně používány IR kamery. Závady zapříčiněné vznikem hot spotů mohou vést až k destrukci modulu.

Hot spoty vznikají z následujících třech důvodů:

- **Vnitřní porucha modulu:** defekt ve struktuře článku (například svod, velký sériový odpor, atd.), praskliny, lokální delaminace, nekvalitní pájené spoje
- **Zastínění/Znečištění:** stínící objekty v okolí (stromy, stožáry,...), přerostlá vegetace, znečištění povrchu
- **Mechanické poškození:** defekty krycího skla, či rámu, nesprávné upevnění

Výkonové ztráty zapříčiněné zastíněním a znečištěním FV modulů mohou být do velké míry zmírněny ve fázi návrhu projektu, v jehož rámci by mělo být podrobně zhodnoceno situování modulů vůči okolním stínícím objektům v průběhu celého roku.

V rámci studie [29] byly analyzovány V-A charakteristiky 260 FV modulů a byly pořízeny jejich IR snímky za běžných provozních podmínek v terénu. Hlavním zjištěním výzkumu byl překvapivě významný dopad nekvalitního provedení pájených spojů. Dle výsledků, zobrazených v levé části obrázku 1.21 byl generovaný výkon modulu snížen o 11 W v důsledku vzniklého hot spotu. Na obrázku 1.21 vpravo je IR snímek poškozeného modulu.



Obrázek 1.21 - V-A charakteristika zkoumaného modulu (vlevo), IR fotografie modulu za podmínek: $G = 690 \text{ W/m}^2$, a $T = 18^\circ\text{C}$ (vpravo) [29]

1.3.3. Mikro praskliny

Vznik mikroprasklin ve struktuře FV článků je závažným problémem. Velmi obtížně se jim předchází a stejně tak obtížně se kvantifikuje jejich vliv na pokles výkonu modulu během jeho životnosti. Při prvním uvedení modulu do provozu mají na výkon zpravidla pouze okrajový vliv, dokud se nepřerouší elektrické spojení mezi sběrnicemi na povrchu poškozeného článku. Nicméně, jak modul stárne a je předmětem působení vnějších vlivů, může dojít k úplné separaci vodivých cest a článek se stane neaktivním.

V ideálním případě jsou články s mikro prasklinami identifikovány a vyřazeny již ve výrobním procesu, ještě před jejich integrací do stringu. K tomu se běžně využívají:

- ultrazvukové metody [30]
- metody termografické sledující tepelný tok [31]
- elektroluminescenční fotografie [32]

Ultrazvuková metoda využívá piezoelektricky vyvolané vibrace o frekvencích 20-90 kHz. Metoda je citlivá na délku praskliny i na její pozici.

Přestože je proces identifikace proveden správně a důsledně, mezi výstupem z výroby a provozem se mohou objevit mikropraskliny nové. U hotového, zapouzdřeného FV modulu mohou být mikropraskliny identifikovány již pouze pomocí elektroluminescence. Ne vždy je ale žádoucí vyřadit na základě jednoho defektu celý modul, jelikož zbytek článků může být ve velmi dobrém stavu.

Elektroluminescence (EL) využívá druhu luminescence, při které jsou excitovány elektrony do vodivostního pásu při zapojení článku v propustném směru a aplikaci elektrického proudu. Protože může být tato technika použita i na celé moduly, je v praxi velmi rozšířená.

Typická aparatura pro měření EL je znázorněna na obrázku 1.22a. [33] EL metoda vyžaduje zapojení článků v propustném směru kvůli emisi infračerveného záření. Spektrum EL se vyskytuje v oblasti vlnových délek od 900 do 1250 nm s maximem okolo 1140 nm. Intenzita emise je přímo závislá na hustotě defektů ve struktuře křemíku, kdy je v případě menšího počtu poruch emitováno více fotonů. EL aparatura by měla být umístěna v temné místnosti. Obraz článku/modulu je snímán chlazenou CCD kamerou. Příklad takové fotografie je na obrázku 1.22b. [33]

Metoda použití elektroluminescence na celý modul byla popsána ve studii z roku 2009. [34] Obrázek 2.15c ukazuje fotografii zkoumaného modulu v IR oblasti. Studie pojednává o úpravě měřící aparatury za účelem získání lepší kvality výsledných obrazů a dodatečně vyšetřuje i vliv mikro prasklin na výkon FV modulů. Bylo prokázáno, že mikro praskliny obecně nesnižují výkon FV modulů o více jak 2,5 %, pokud prasklina nenarušuje elektrické spojení mezi článkem a fragmenty.

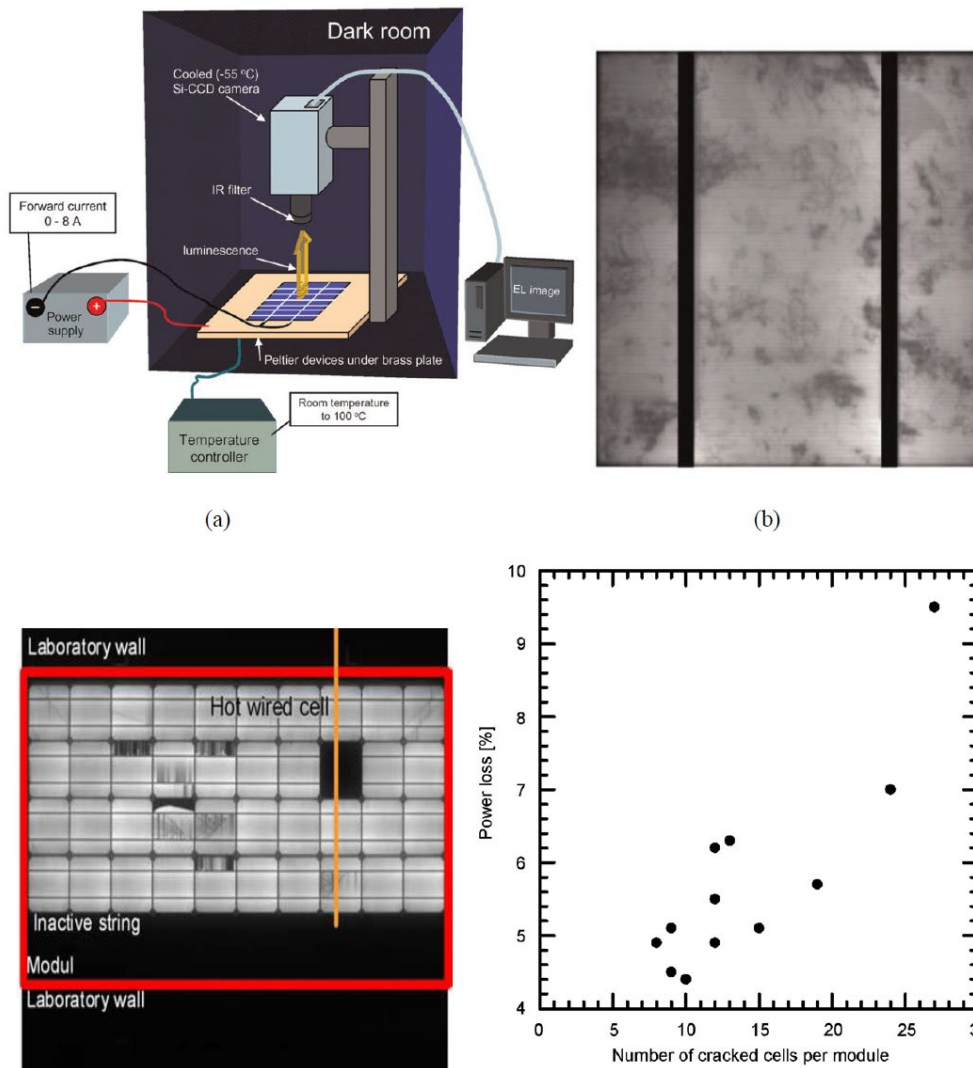
Stejný autor v jiné studii z roku 2011 [35] vyšetřuje dopad mikro prasklin na výkon FV modulu v závislosti na počtu prasklých článků. Výkonová ztráta byla vyčíslena na přibližně 9,6 % pro moduly, které obsahovaly více jak 25 poškozených článků. Dodatečně, pro moduly s počtem poškozených článků mezi 10-15 dosahuje maximální výkonová ztráta 6,4 %. Na obrázku 1.22d je vyobrazena detailní závislost pro různý počet prasklin v rámci jednoho modulu.

Dle zjištěných výsledků byla sestavena následující rovnice. Poškozený článek je stále polarizován v propustném směru, pokud je splněna podmínka:

$$\frac{A_{poš}}{A_{celková}} = \frac{I_{sc} - I_{mpp}}{I_{sc}} \quad (16)$$

kde

$A_{celková}$ je celková plocha FV článku
 $A_{poš}$ je poškozená plocha FV článku.



Obrázek 1.22 - a) Typická aparatura k pořizování EL snímků, b) Příklad EL snímku [32] FV článku [33], c) EL snímek modulu [35], d) závislost výkonové ztráty na počtu defektních článků v rámci modulu [35]

Jak bylo uvedeno v této kapitole, defekty FV prvků mohou vést k významnému snížení MPP celé elektrárny. Ke spolehlivému včasnému podchycení defektů je ale třeba zdokonalit metody jejich detekce. Současné metody vyžadují rozsáhlá měření a sběr velkého počtu dat o stavu systému, což vede ke zvýšení nákladů na provoz a komplexnější architektuře FV systému.

Nejčastějším poruchovým stavem je u reálných instalací částečné zastínění modulů. Ke zvýšení množství generované energie a potlačení tohoto jevu lze použít třech technik, diskutovaných v kapitole 1.4.

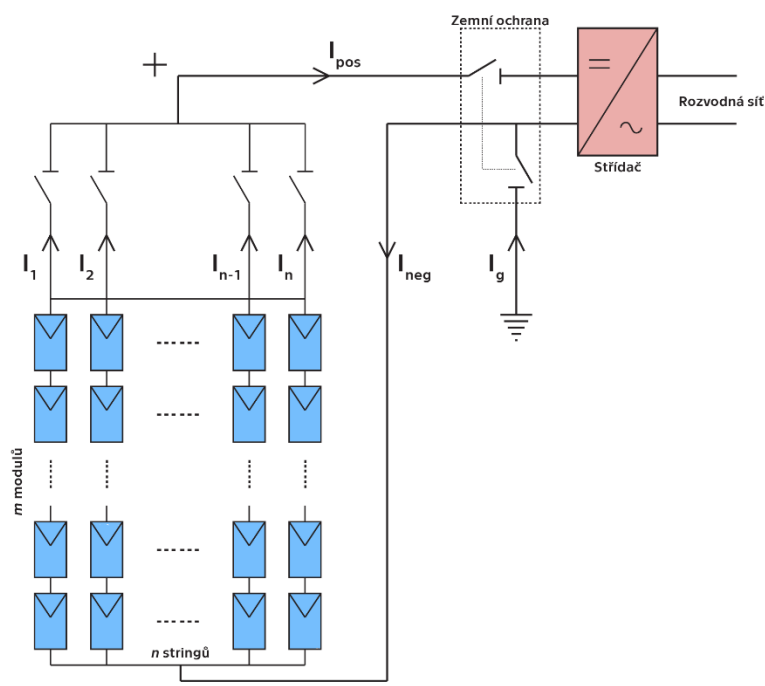
Pro zlepšení současného stavu je zapotřebí dalšího výzkumu, který by tyto tři techniky sjednotil do ucelené metody. Většina MPPT zařízení je schopna detekovat MPP s účinností 99 %, nicméně technika MPTT nebyla doposud používána v elektrárnách se složitější topologií propojení modulů a stringů. Doposud nebyly vyvinuty algoritmy a techniky vedoucí k podstatnému zlepšení výkonových parametrů instalací obsahujících defekty typu hot spoty a mikro praskliny.

1.4. Možnosti detekce závad na FV modulech

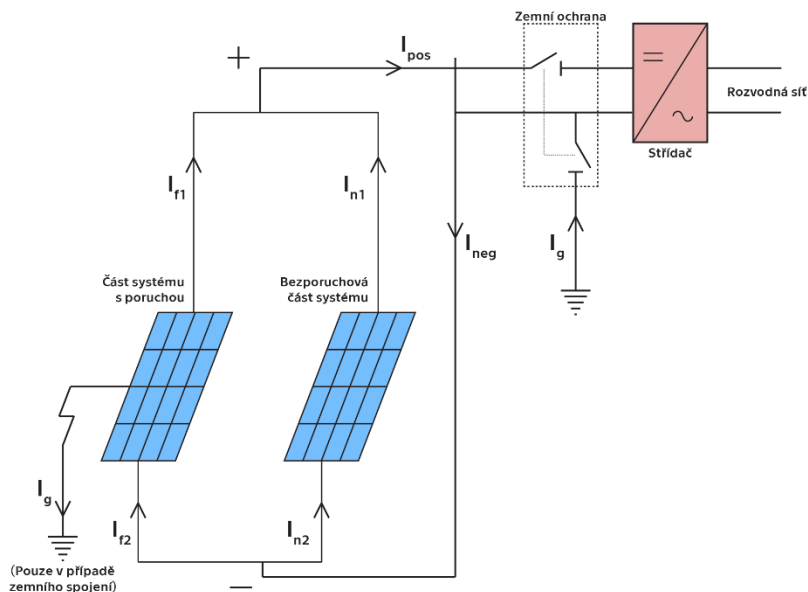
V této kapitole jsou detailněji popsány tři základní přístupy k detekci vad na FV modulech. Pro ilustraci jsou demonstrovány na typickém FV systému sestávajícího se ze sério-paralelní konfigurace modulů s n paralelními stringy, z nichž každý string obsahuje m modulů. Celý systém operuje za normálních podmínek a každý string generuje proud $I_1, I_2 \dots I_n$, jejichž hodnoty jsou v případě bezporuchového provozu identické. Celkový proud vstupující do střídače je pak jejich součtem. Za normálního provozu jsou oba spínače v zemi ochraně zavřeny a zemní proud I_g je nulový. Z toho vyplývá, že proud vstupující do střídače I_{pos} , by měl být rovný proudu výstupnímu I_{neg} .

Pokud nastane v systému na obrázku 1.23 porucha, lze jej překreslit jako kombinaci dvou skupin FV stringů (Obrázek 1.24), v němž proud I_{f1} vstupuje a I_{f2} vystupuje z poškozené části stringu. Ve druhém, nepoškozeném stringu obdobně vstupují a vystupují proudy I_{n1} a I_{n2} , které jsou sobě rovné.

Pokud není závada na systému typu zemního spojení, bude proud I_g nulový a $I_{f1} = I_{f2}$. V případě, že k zemnímu spojení dojde, proud I_g může nabývat kladných hodnot a po překročení určité hranice (řádově desítky Ampérů) tento proud sepne zemní ochranu – rozpojí se oba spínače - a tím izoluje celý FV systém od sítě.



Obrázek 1.23 - Schéma FV systému zapojeného do rozvodné sítě o $m \times n$ modulech



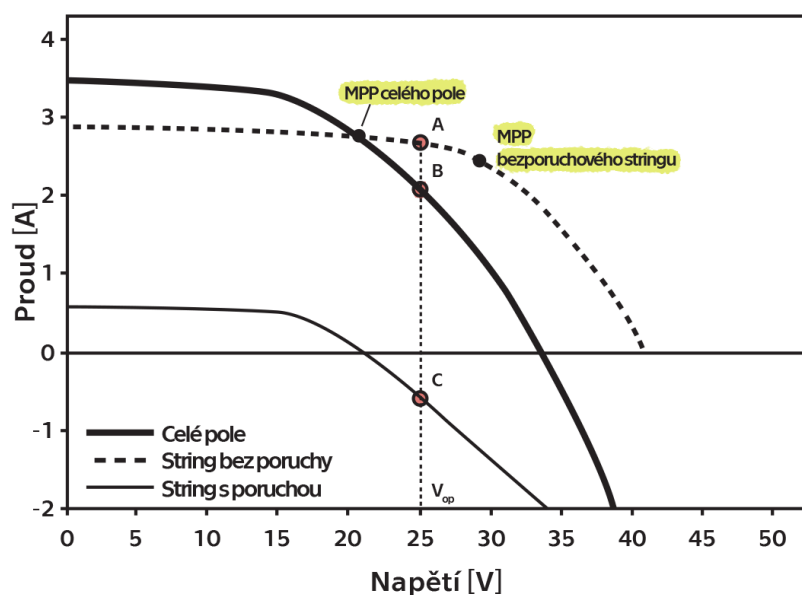
Obrázek 1.24 - Upravené schéma FV systému v případě poruchy

Pro diagnostiku těchto chybových stavů jsou nejčastěji využívány tři postupy, podrobněji rozepsané v následujících podkapitolách.

1.4.1. Analýza V-A charakteristiky

V-A charakteristika (viz kapitola 1.1.2) popisuje chování FV systému a je využívána jako základní diagnostický nástroj pro jak monitorování v klidovém stavu, tak i určení místa a typu poruchy. V sério-paralelně zapojeném fotovoltaickém systému, sdílí bezporuchová část i část s poruchou stejné pracovní napětí. Podle V-A charakteristik jednotlivých stringů a jejich pracovního napětí, je možné odvodit pracovní body bezporuchových a poruchových částí pole.

Obvykle platí, že porucha konkrétního modulu způsobí změnu napětí a nevyváženost proudů mezi jednotlivými stringy. V některých případech mohou tyto proudy téct závěrně do poškozeného stringu a poškodit moduly, či propojovací vodiče. [36] Na následujícím obrázku 1.25 je, pro názornost, graf V-A charakteristiky FV pole obsahujícího poruchu (Obrázek 1.24).



Obrázek 1.25 - V-A charakteristika FV pole obsahujícího poruchu při normálních provozních podmínkách

I-V charakteristiky celého pole, poruchové a bezporuchové části se na první pohled značně liší. Jelikož jsou část obsahující poruchu a část bez poruch v paralelním zapojení, musí pracovat na stejném napětí. Jejich MPP ale vlivem poruchy již není identické. Například při provozním napětí U_{OP} jsou provozní body různých částí systému zobrazeny jako A, B a C. Na příkladu je rovněž vidět, že přestože celým polem teče i při poruše proud v kladném směru, poškozeným stringem teče proud zpětný, který může string mechanicky poškodit.

Hlavní příčinou zpětného proudu je to, že V-A křivka porušeného stringu vykazuje pokles napětí naprázdno (V_{OC}). Provozní napětí pole se však nezmění ihned po poruše, protože sledovač MPPT ve střídači neumí reagovat na poruchové stavy dostatečně rychle. MPPT proto udržuje bezprostředně po poruše napětí systému relativně konstantní, v důsledku čehož je chybný string, který v bezporuchovém provozu pracuje v prvním kvadrantu jako zdroj, nucen operovat ve čtvrtém kvadrantu jeho V-A charakteristiky a pro zbytek systému tak představuje zátěž. Pokud k poruše dojde za jasného dne, je pravděpodobné, že zpětný proud bude dostatečně velký na to, aby zareagovala nadproudová ochrana¹¹, zapojená v sérii se stringem. Pokud se však porucha vyskytne v období husté oblačnosti, či v noci, zpětný proud k sepnutí nadproudové ochrany nemusí nabýt dostatečné hodnoty.

¹¹ Nadproudové ochrany se instalují na stringy s více jak dvěma moduly v sérii. Jmenovitá hodnota nadproudu zařízení nesmí být menší než 156% jmenovitého zkratového proudu modulu I_{sc} [36]

1.4.2. Analýza pomocí Kirchhoffova proudového zákona

Kirchhoffův proudový zákon říká, že součet proudů vtékajících a vytékajících v každém uzlu elektrického obvodu byl nulový. Tudiž součet vtékajících proudů = mínus součet vytékajících proudů. Z tohoto hlediska může být na zemní spojení, kladnou i zápornou sběrnici i střídač pohlíženo jako na uzel.

Aplikací této analýzy na FV systém z obrázku 1.24 s poruchou zemního spojení musí proudové závislosti splňovat:

- V místě zemní poruchy: $I_{f2} - (I_{f1} + I_g) = 0$
- Na kladné sběrnici: $(I_{f1} + I_{n1}) - I_{pos} = 0$
- Na záporné sběrnici: $I_{neg} - (I_{f2} + I_{n2}) = 0$
- Na střídači: $I_{in} = I_{out}$ a $I_{in} = I_{pos}$
- V místě zemní ochrany: $I_{out} + I_g - I_{neg} = 0$

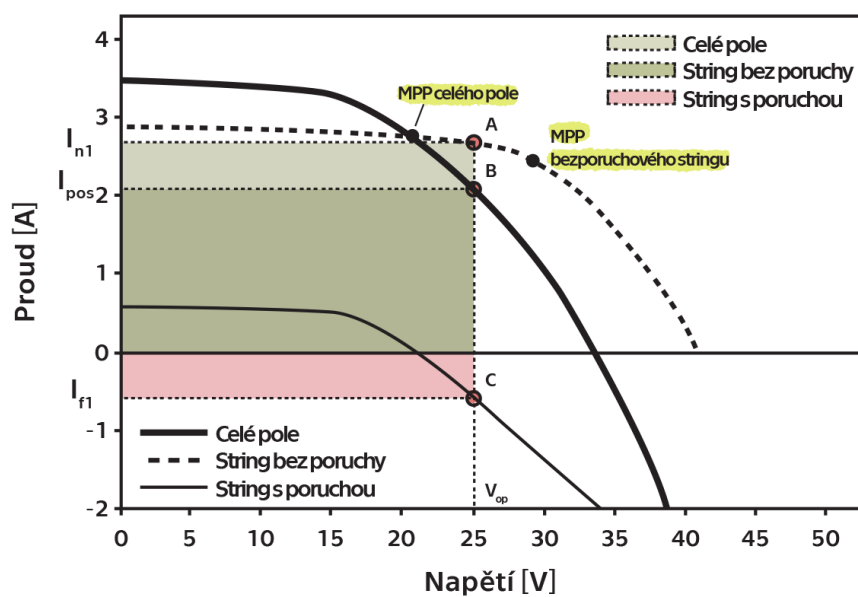
1.4.3. Zachování energie

Na FV systém lze aplikovat zákon zachování energie. Generovaný výkon musí být roven součtu výkonu do zátěže, výkonu všech známých systémových ztrát a výkonu ztraceného vlivem poruchy.

$$P_G = P_{ZÁTĚŽ} + P_{ZTRÁTY} + P_{PORUCHY} \quad (17)$$

P_G je výkon generovaný FV systémem, $P_{ZÁTĚŽ}$ reprezentuje výkon vstupující do střídače, $P_{ZTRÁTY}$ jsou výkonové ztráty v systému, které jsou způsobeny především odporem vodičů [41] a $P_{PORUCHY}$, který představuje výkon zmařený v místě výskytu poruchy.

Zachování výkonu může být odvozeno z V-A charakteristiky systému, pracujícím v poruchovém stavu (obr. 1.15). Jelikož při napětí U_{op} platí $I_{pos} = (I_{n1} + I_{f1})$, lze odvodit, že $I_{pos} * U_{op} = (I_{n1} + I_{f1}) * U_{op}$, což je ekvivalentem k $P_G = P_{ZÁTĚŽ} + P_{PORUCHY}$. Ztrátový výkon je v tomto případě zanedbatelný. Na obrázku níže je znázorněn diagram popisovaného případu.



Obrázek 1.26 – Zachování výkonu u FV systému v poruchovém stavu

2. Praktická část

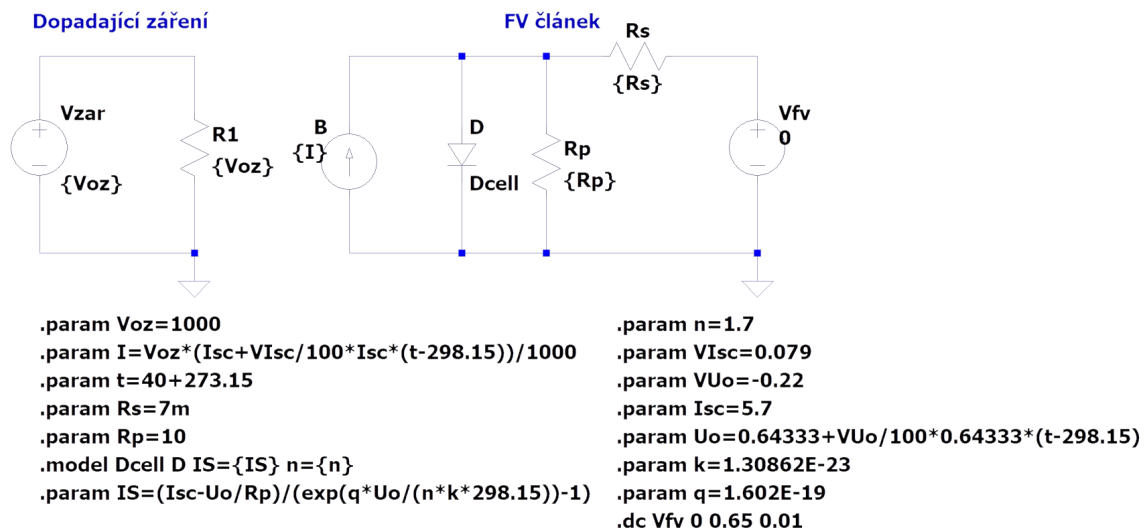
Po prostudování teorie, potřebné k pochopení problematiky poruch na FV modulech bylo přistoupeno k simulaci a její korelaci s reálně naměřenými hodnotami na FVE. V první části kapitoly je vysvětlen postup modelování v softwaru LTspice, druhá kapitola popisuje FV elektrárnu, na níž byla naměřena zde prezentovaná data a přístroje, jimiž byla tato data získávána. Poté následují kapitoly zobrazující porovnání naměřených a modelovaných dat a reakce parametrů střídače na poruchu části stringu, simulovanou pomocí částečných zastínění.

2.1. Software k vytvoření modelu FV systému

Pro modelování byl zvolen software LTspice XVII, vyvinutý Mikem Engelhardtem, pro společnost Linear Technology (LTC). Jedná se o zdarma stažitelný program, v němž je implementován SPICE simulátor elektrických obvodů. Ke stažení zde. [37]

2.1.1. Model FVČ

K simulaci lze využít buď jednodiodového, či dvoudiodového modelu (viz kapitola 1.1.1). Dvoudiodový model dává sice dle teorie přesnější výsledky, ale také zdvojnásobuje počet rovnic a počet neznámých, v důsledku čehož je výpočet mnohem komplexnější. V rámci této práce byl z důvodu redukce složitosti schémat a výpočetních chyb zvolen jednodiodový model FVČ.



Obrázek 2.1 – Základní jednodiodový model FVČ v LTspice

Dopadající záření lze v modelu měnit změnou parametru V_{zar} , jehož číselná hodnota je stejná jako odporu $R1$ tak, aby proud odporem byl 1 A. Je tak simulována hodnota intenzity záření G , která je rovna V_{zar} . Změnou tohoto napětí je možné měnit hodnotu intenzity záření. Hodnotu závěrného

saturačního proudu I_s lze vyčíst a zadat jako parametr do programu aplikací rovnice (13). Napětí naprázdno U_{OC} bylo zadáno jako parametr užitím rovnice (15). Zdroj stejnosměrného proudu, jehož parametr se mění podle intenzity dopadajícího záření a teploty je modelován pomocí rovnice (14). Další chybějící hodnoty veličin pro výpočet rovnic byly získány z datasheetu modulů.

Hodnoty sériových i paralelních odporů byly do modelu nastaveny tak, aby V-A charakteristiky co nejlépe odpovídaly charakteristikám reálně naměřeným. S efektem T a G na změnu R_s a R_p nebylo, vzhledem k jejich malé variaci během měření, v rámci modelu počítáno.

Jelikož výrobce modulů neudává hodnotu faktoru ideality diody n , bylo nutno jej metodou pokusu nastavit na takovou hodnotu, aby model dával výsledky co nejméně odlišné od reálného měření¹².

2.1.2. Model stringu modulů

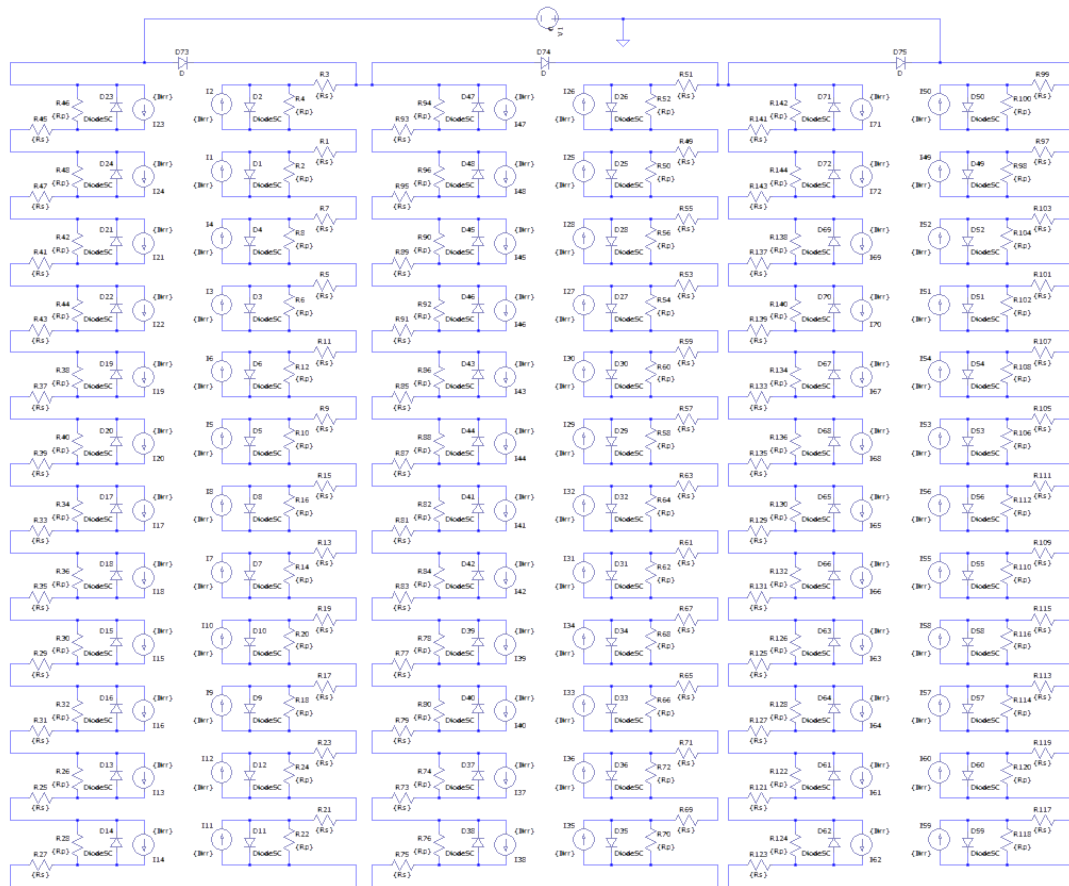
Kvůli porovnání experimentálního měření v terénu a LTspice bylo přistupováno ke tvoření modelu z hlediska co největší volnosti změny parametrů jednotlivých článků v libovolné části celého stringu. To mělo sice za důsledek podstatné zpomalení výpočtu, ovšem jak je vidět na porovnání v sekcích 2.3.3.1 až 2.3.3.4, bylo touto praxí dosaženo poměrně dobré shody s reálně naměřenými hodnotami.

Zastínění jednotlivých FVČ / částí modulů bylo v modelu simulováno ruční změnou I u konkrétních článků na nulovou hodnotu.

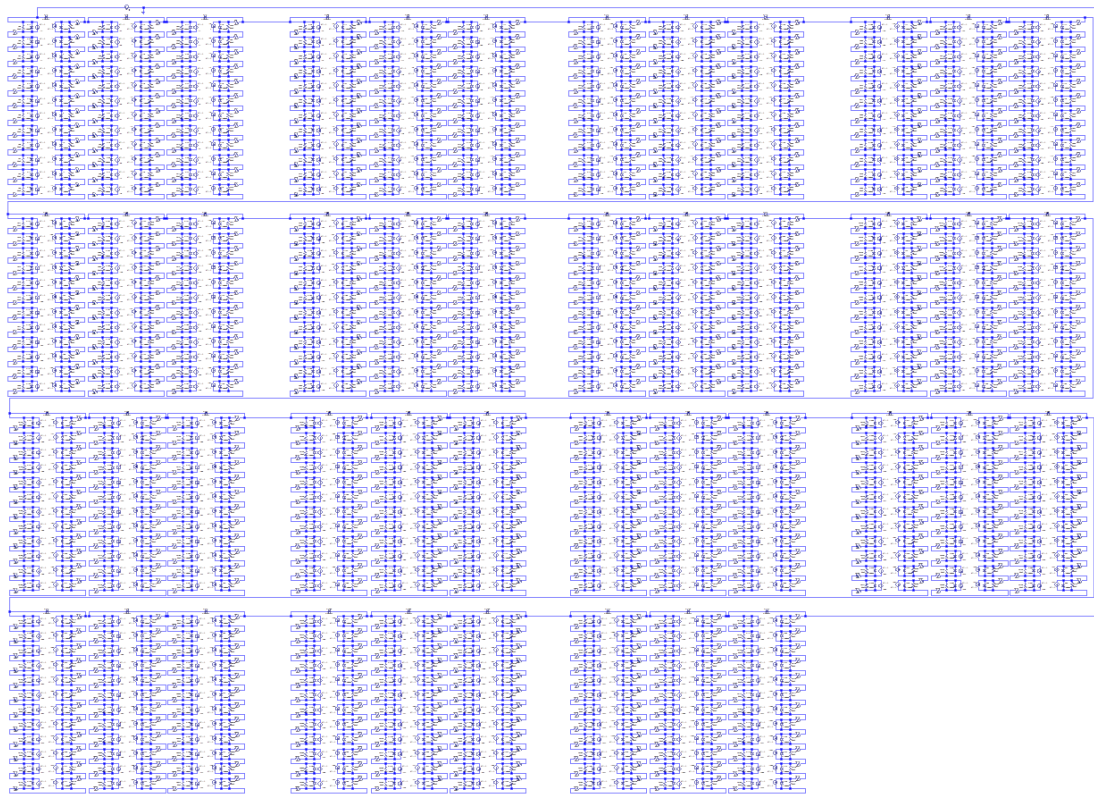
Všechny moduly jsou spojeny v rámci modelovaného stringu do série. Obrázek 2.2 slouží pouze k bližší ilustraci zapojení jednoho modulu. Pohled na samotný výpočetní model je znázorněn na obrázku 2.3.

- Všechny články jsou modelovány jednodiodovým modelem, dle schématu v kapitole 1.1.1.1.
- Každý modul sestává ze sériového zapojení 72 článků se třemi bypass diodami, které přemostují vždy třetinu modulu. Jde tedy o konfiguraci 3x24 článků.
- Model celého stringu obsahuje 15 sériově zapojených modulů.

¹² Faktor ideality diody leží v intervalu: $n \in (1,2)$.



Obrázek 2.2 – Model jednoho FV modulu v LTspice

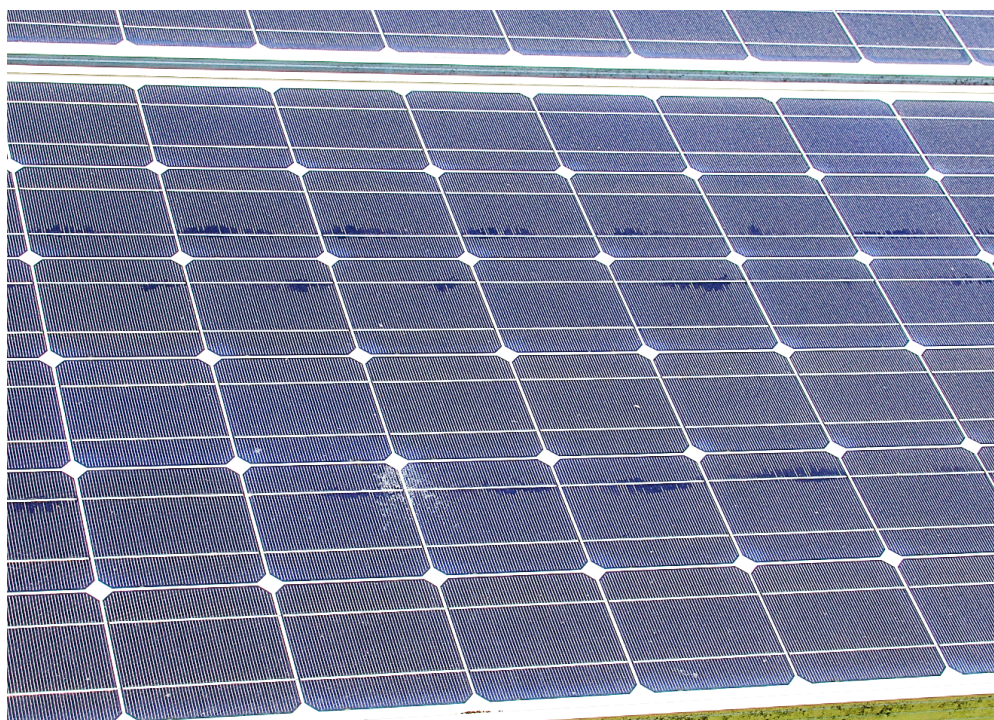


Obrázek 2.3 – Model 15 modulů ve stringu v LTspice

2.2. Měření na FVE

2.2.1. Elektrárna Onyx II

Elektrárna Onyx II, na níž probíhalo měření, byla uvedena do provozu 7. prosince roku 2010. Instalované moduly byly tedy v době měření nejméně 9 let staré. Jejich výrobce (stejně jako většina výrobců na trhu) garantuje životnost 20 let. Dle definice životnosti by moduly po uplynutí těchto 20 let měly stále při STC generovat 80% energie v porovnání s původním výkonem. Na fotografii níže, pořízené během měření, jsou patrné defekty modulu snižující jeho účinnost.



Obrázek 2.4 - Fotografie jednoho z modulů v testovaném stringu ilustrující stárnutí instalace (upraven jas, kontrast a ostrost pro přehlednost)

V rámci celé elektrárny je instalováno celkem 81 střídačů stejného typu, přičemž na každý z nich je připojeno 100 modulů v 6 stringách, v konfiguraci 5x17 + 1x15 modulů. Celkem je tedy instalován jmenovitý výkon 1.499 MW. Pole takto propojených modulů by teoreticky mělo při STC podmínkách generovat přibližně $100 \times 185 \text{ W} = 18,5 \text{ kW}$ výkonu. Při měření ovšem bylo dosaženo nejvyšší hodnoty 15,8 kW. Důvodem je jednak snížení výkonu vlivem teploty povrchu modulů, která se během měření pohybovala okolo 40°C a také zmíněná částečná degradace modulů.

V následujících třech tabulkách jsou přehledně vypsány všechny relevantní parametry týkající se elektrárny, modulů a střídačů.

Tabulka 2.1 - Údaje o elektrárně

Správce FVE	Onyx Energy projekt II s r.o.
Název	FVE Onyx II
Výkon	1.499 MW
Adresa	Zdice, 267 51
Zahájení provozu	7.12.2010

Tabulka 2.2 - Údaje o modulech

Výrobce	Aide Solar
Model	XZST-185W
Jmenovitý maximální výkon P_{max}	185 W (±3%)
Proud při P_{max} (IMPP)	5.02 A
Napětí při P_{max} (UMPP)	37.00 V
Proud nakrátko (ISC)	5.40 A
Napětí naprázdno (UOC)	45.30 V
Nominální provozní teplota (T_{noct})	48 ± 2 °C
Aplikace modulu	Třída A
Váha	15 kg
Rozměry	1580 x 808 x 35 mm
Maximální napětí systému	1000 V

Tabulka 2.3 - Údaje o střídačích

Výrobce	SMA Solar Technology AG
Model	STP 17000TL-10
VDC max	1000 V
VDC MPP	400 - 800 V
IDC max	33 A / 11 A
ISC PV	50 A / 17 A
VAC,r	380/400/415 V
PAC,r	17000 W
Smax	17000 VA
FAC,r	50/60 Hz
IAC max	24.6 A



Obrázek 2.5 – Fotografie jednoho z 81 bloků v elektrárně: 5x17 + 1x15 modulů zapojených na jeden střídač, elektrárna Onyx II

2.2.2. Použité přístroje

2.2.2.1. Tester Metrel MI 3108 PS Eurotest PV

Pomocí tohoto přístroje byly proměřeny základní parametry a V-A charakteristiky stringu ve 4 případech zastínění.



Obrázek 2.6 - Použitý přístroj Metrel MI 3108

Tabulka 2.4 - Technická data Metrel MI 3108

Funkce	Měřící rozsah	Základní chyba měření
Napětí	0 V DC ... 999 V DC	$\pm(1,5 \% \text{ z MH} + 5 \text{ D})$
	0 V AC ... 999 V AC	$\pm(1,5 \% \text{ z MH} + 3 \text{ D})$
	I-V m.: 20 V DC ... 999 V DC	$\pm(2 \% \text{ z MH} + 2 \text{ D})$
Proud	Modul m.: 0,0 mA ... 300 A DC	$\pm(1,5 \% \text{ z MH} + 5 \text{ D})$
	Invert. m.: 0,0 mA ... 300 A AC	$\pm(1,5 \% \text{ z MH} + 3 \text{ D})$
	I-V m.: 0,00 A ... 15 A DC	$\pm(2 \% \text{ z MH} + 3 \text{ D})$
Výkon	Modul m.: 0 ... 200 kW	$\pm(2,5 \% \text{ z MH} + 6 \text{ D})$

Funkce	Měřicí rozsah	Základní chyba měření
	I-V m.: 0 ... 15 kW	$\pm(3 \% \text{ z MH} + 5 \text{ D})$
Energie	0,000 Wh - 1999 kWh	
I-V křivka	1000 V / 15 A / 15 kW	
Ozáření	0 ... 2000 W/m	$\pm (5 \% \text{ z MH} + 5 \text{ D})$
Teplota	-10°C ... + 85°C	$\pm 5 \text{ D}$

2.2.2.2. Přístroje pro měření intenzity záření a teploty



Obrázek 2.7 - Sensory pro měření teploty a intenzity záření

2.2.3. Metoda měření: V-A charakteristiky

Na každý střídač je sice napojeno celkem 100 modulů (pole), ale z hlediska potřeb ověření funkce modelu a složitých propojovacích operací, které by byly třeba provést k měření všech modulů bylo přistoupeno k měření pouze na jednom stringu.

String 15 modulů byl odpojen od střídače a připojen na kontakty měřícího přístroje Metrel. Za neustálého monitoringu povrchové teploty modulů termočlánkem a měření intenzity dopadajícího záření pyranometrem byly testovány celkem 4 konfigurace zastínění, které slouží jako srovnávací hodnoty pro vytvořený model. Přesné konfigurace zastínění jsou názorně ukázány na obrázku 2.12.

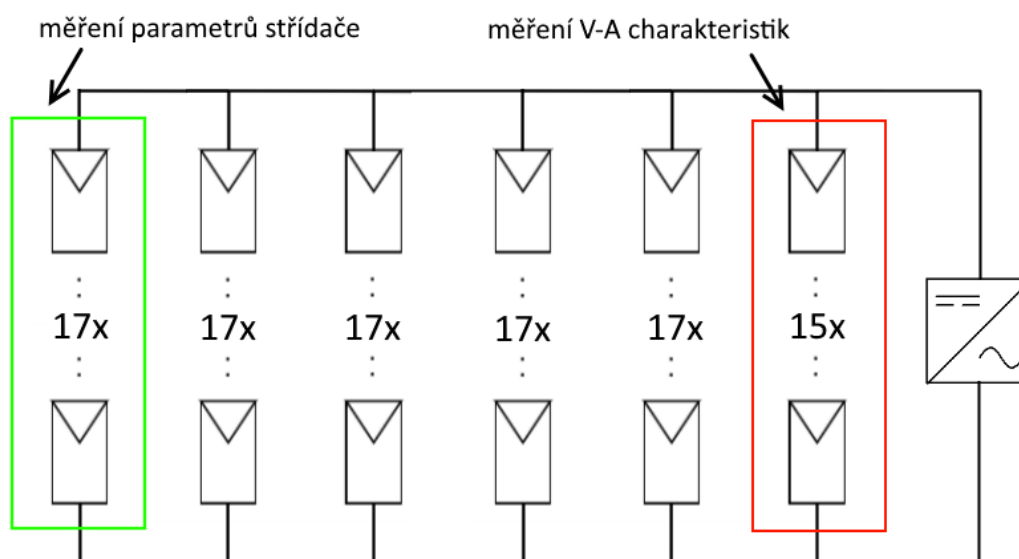
Po umístění zastiňovacích prvků (kartonových karet), byl spuštěn přístroj Metrel a do jeho paměti byla zalogována V-A charakteristika dané konfigurace.

Tabulka 2.5 - Konfigurace zastínění použité při experimentálním měření přístrojem Metrel

Označení zastínění	Zastíněné moduly
A	Zastínění 2 článků, jež přemostuje 1 bypass dioda v rámci 1 modulu
A+B	Zastínění 4 článků, jež přemostují 2 bypass diody v rámci 2 modulů
A+B+C	Zastínění 6 článků, jež přemostují 3 bypass diody v rámci 3 modulů
D	Zastínění 2/3 modulu přes 3 bypass diody



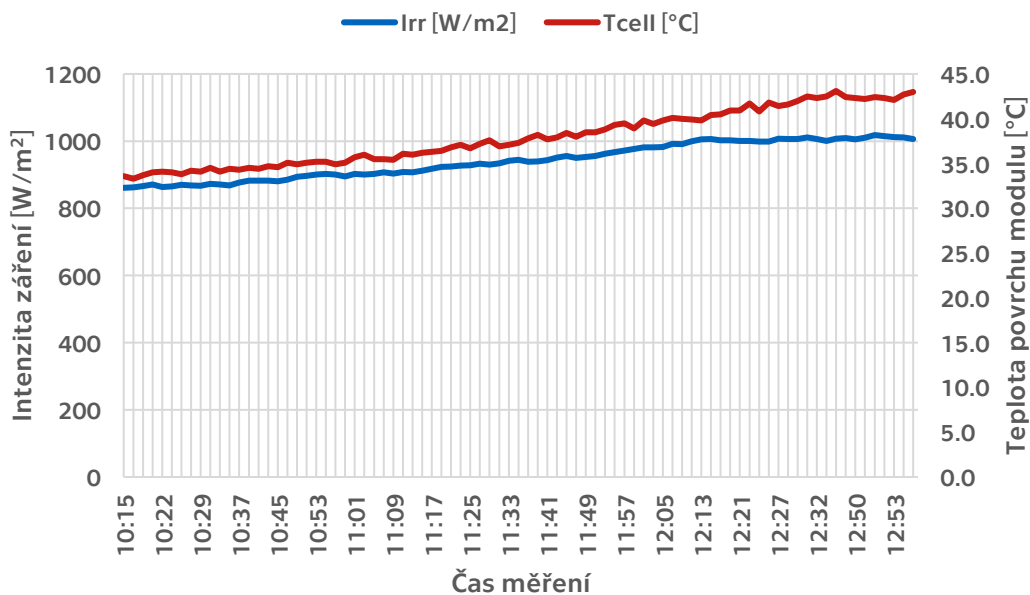
Obrázek 2.8 – Příklad zastínění při měření V-A charakteristik: varianta D



Obrázek 2.9 - Schéma zapojení 100 modulů na jeden střídač, s vyznačením testovaných stringů

2.3. Výsledky měření V-A charakteristik a shoda s modelem

2.3.1. Křivky intenzity záření a teploty během měření



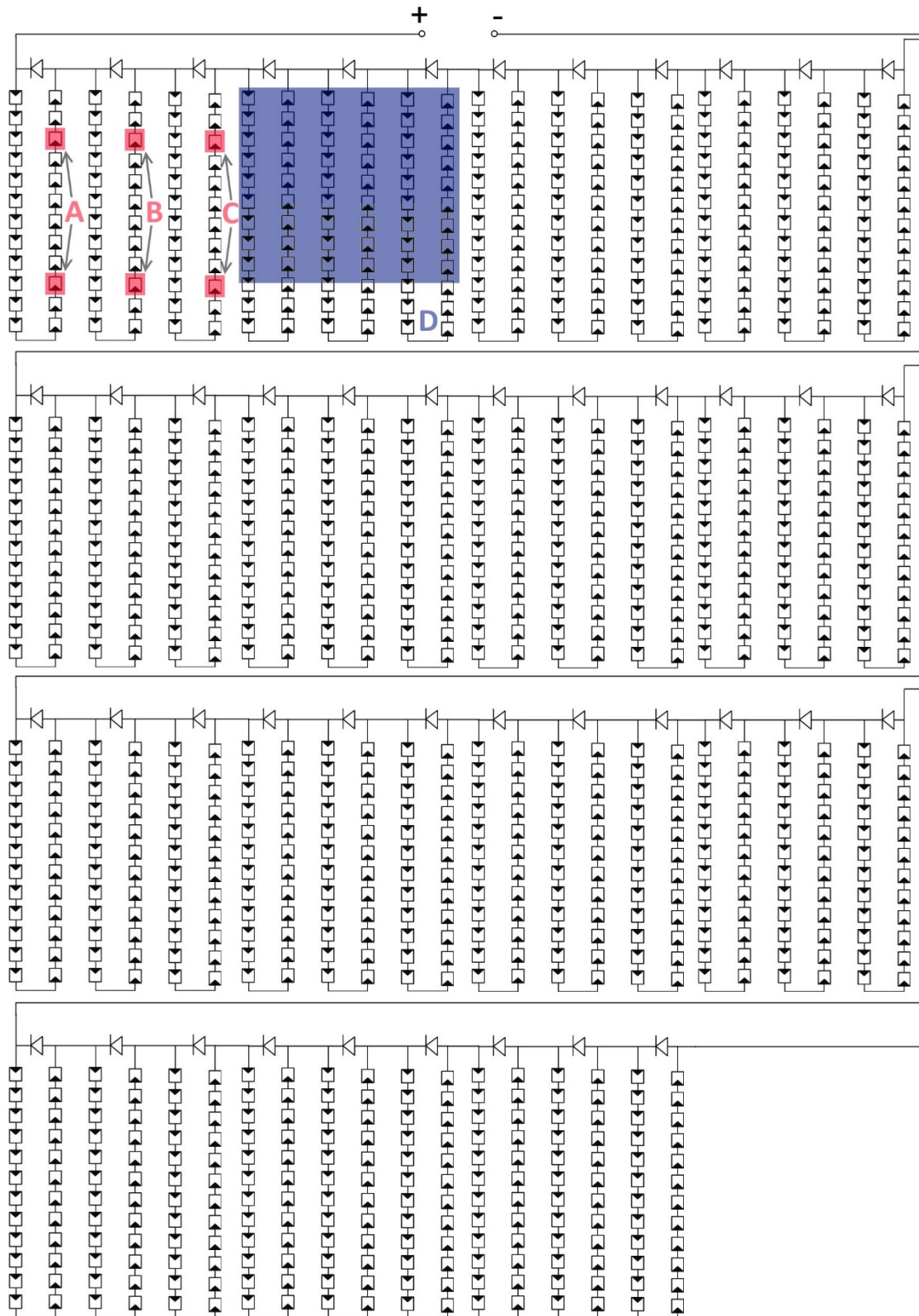
Obrázek 2.10 - Grafy průběhů teploty a intenzity záření během měření

2.3.2. Měřený string modulů



Obrázek 2.11 – Letecká mapa elektrárny Onyx II s vyznačenými místy měření (zdroj snímku: mapy.cz)

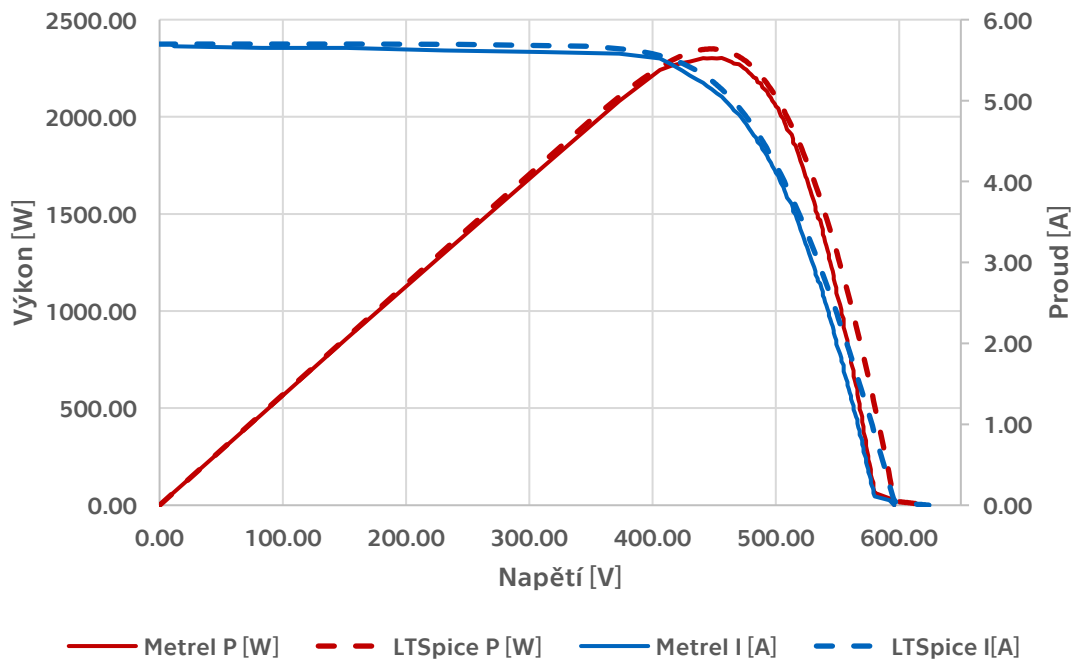
2.3.3. Grafické znázornění simulovaných případů zastínění



Obrázek 2.12 - Znáznornění postupného zákrytu modulů při měření V-A charakteristik (15 modulů ve stringu)

2.3.3.1. Příklad 1 – zastíněna 1/3 modulu (A)

Pro názornost porovnání měřených hodnot na elektrárně, získaných pomocí přístroje Metrel a hodnot modelovaných softwarem LTSpice byly v této, a dalších třech podkapitolách vyhotoveny 4 dvojice charakteristik a tabulek. V grafu je vždy znázorněna výkonová a proudová charakteristika v závislosti na napětí. V tabulce je porovnání typických sledovaných veličin a jejich procentuální odchylka.

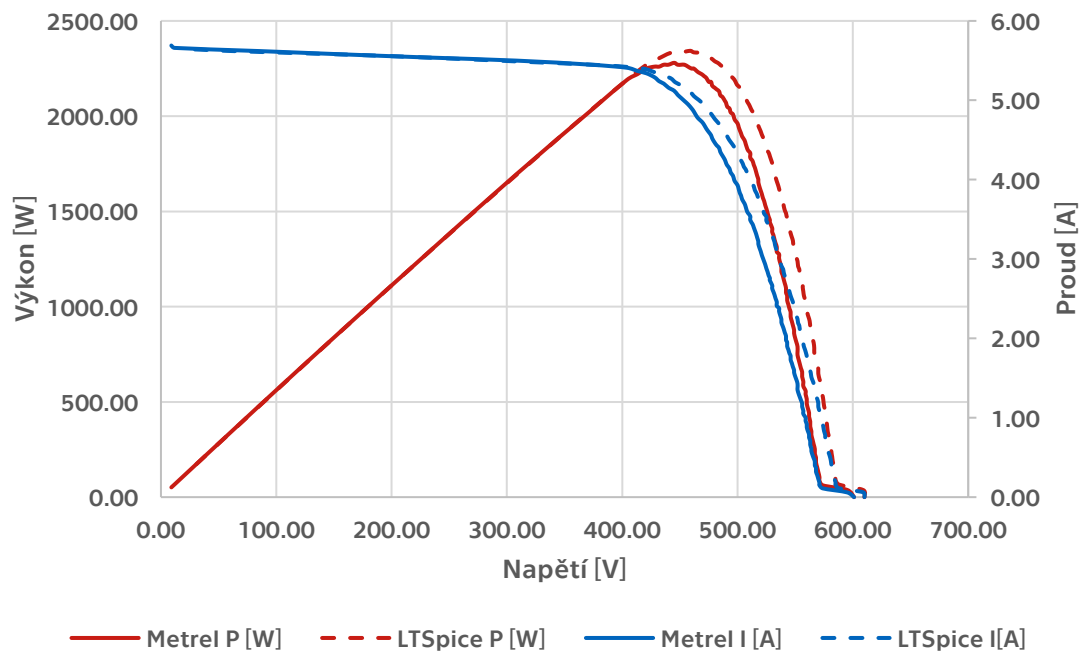


Obrázek 2.13 - Porovnání V-A charakteristik reálně měřených hodnot a modelu v LTSpice pro případ A

Tabulka 2.6 - Odchylka modelu od reálného měření – případ A

Veličina	Reálné měření	Simulace v LTSpice	Odchylka [%]
I_{sc} [A]	5.70	5.70	0.04
U_{oc} [V]	596.00	624.08	4.50
P_{MPP} [W]	2302.80	2349.35	1.98
I_{MPP} [A]	5.14	5.24	1.84
U_{MPP} [V]	448.00	448.64	0.14
FF_{string} [%]	67.78	68.37	1.15
T [°C]	39.4		-
G [W/m ²]	979		-
Plocha 15 modulů [m ²]	19.15		-
Získaná el. energie [W/m ²]	120.25	122.68	1.98

2.3.3.2. Příklad 2 – zastíněna 2x 1/3 modulu (A+B)

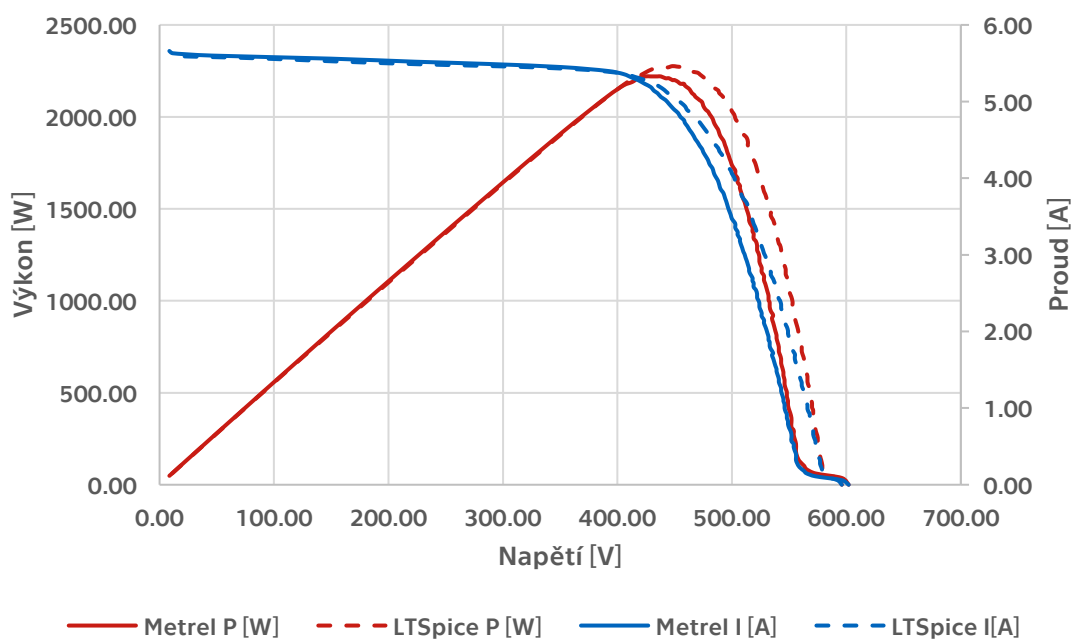


Obrázek 2.14 - Porovnání V-A charakteristik reálně měřených hodnot a modelu v LTSpice pro případ A+B

Tabulka 2.7 - Odchylka modelu od reálného měření – případ A+B

Veličina	Reálné měření	Simulace v LTSpice	Odchylka [%]
I_{sc} [A]	5.69	5.67	0.29
U_{oc} [V]	601.00	610.00	1.48
P_{MPP} [W]	2278.40	2331.12	2.26
I_{MPP} [A]	5.12	5.15	0.50
U_{MPP} [V]	445.00	454.50	2.09
FF_{string} [%]	66.63	67.58	1.41
T [°C]	42.3		-
G [W/m ²]	1018		-
Plocha 15 modulů [m ²]	19.15		-
Získaná el. energie [W/m ²]	118.98	121.73	2.26

2.3.3.3. Příklad 3 - zastíněna 3x 1/3 modulu (A+B+C)

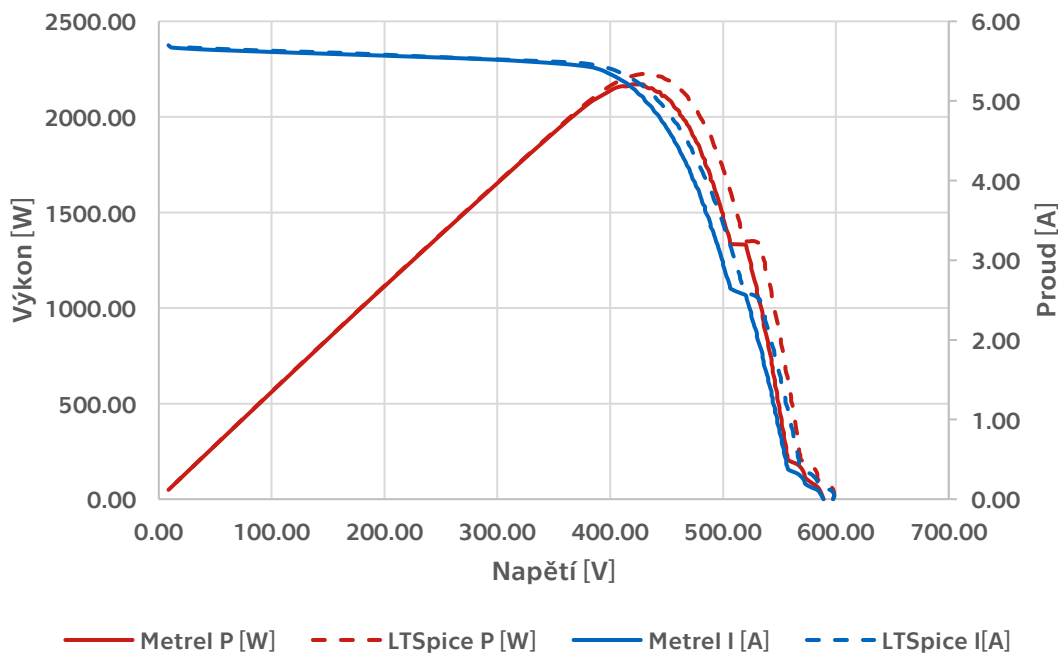


Obrázek 2.15 - Porovnání V-A charakteristik reálně měřených hodnot a modelu v LTSpice pro případ A+B+C

Tabulka 2.8 - Odchylka modelu od reálného měření – případ A+B+C

Veličina	Reálné měření	Simulace v LTSpice	Odchylka [%]
I_{sc} [A]	5.66	5.63	0.61
U_{oc} [V]	602.00	596.00	1.01
P_{MPP} [W]	2220.48	2271.59	2.25
I_{MPP} [A]	5.14	5.15	0.21
U_{MPP} [V]	432.00	436.00	0.92
FF_{string} [%]	65.17	66.98	2.71
T [°C]	42.4		-
G [W/m²]	1008		-
Plocha 15 modulů [m²]	19.15		-
Získaná el. energie [W/m²]	115.95	118.62	2.25

2.3.3.4. Příklad 4 – zastíněna polovina modulu ve stringu přes všechny bypass diody (D)



Obrázek 2.16 - Porovnání V-A charakteristik reálně měřených hodnot a modelu v LTSpice pro případ D

Tabulka 2.9 - Odchylka modelu od reálného měření – případ D

Veličina	Reálné měření	Simulace v LTSpice	Odchylka [%]
I_{sc} [A]	5.70	5.71	0.09
U_{oc} [V]	589.00	597.49	1.42
P_{MPP} [W]	2169.08	2226.54	2.58
I_{MPP} [A]	5.14	5.10	0.83
U_{MPP} [V]	422.00	436.79	3.39
FF_{string} [%]	64.61	65.32	1.09
T [°C]	42.1		-
G [W/m ²]	1015		-
Plocha 15 modulů [m ²]	19.15		-
Získaná el. energie [W/m ²]	113.27	116.27	2.58

2.4. Měření na střídači

2.4.1. Měření proudů fází na střídači

V elektrárně se nachází celkem 81 DC/AC měničů. Jsou vždy umístěny na zadní straně jednoho pole – 6 stringů čítající celkem 100 modulů. Umístění střídače zvoleného k pokusům se zastíněním je vidět na obrázku 2.11. Konkrétní střídač, z nějž byly odečítány hodnoty je vyfocen níže na obrázku 2.17. (S/N 2110088697). Typický výkon střídače během měření se v závislosti na konfiguraci zastínění pohyboval mezi – 13 – 16 kW.

Po umístění zastíňovacích prvků na vybrané FVČ byly hodnoty ze střídače odečítány přes webové rozhraní serveru elektrárny z notebooku přítomného technika.

Hlavním sledovaným parametrem byly proudy stringy **A1 – A5** (obsahující 5x17 modulů) a **B** (obsahující 15 modulů), vstupující do střídače.

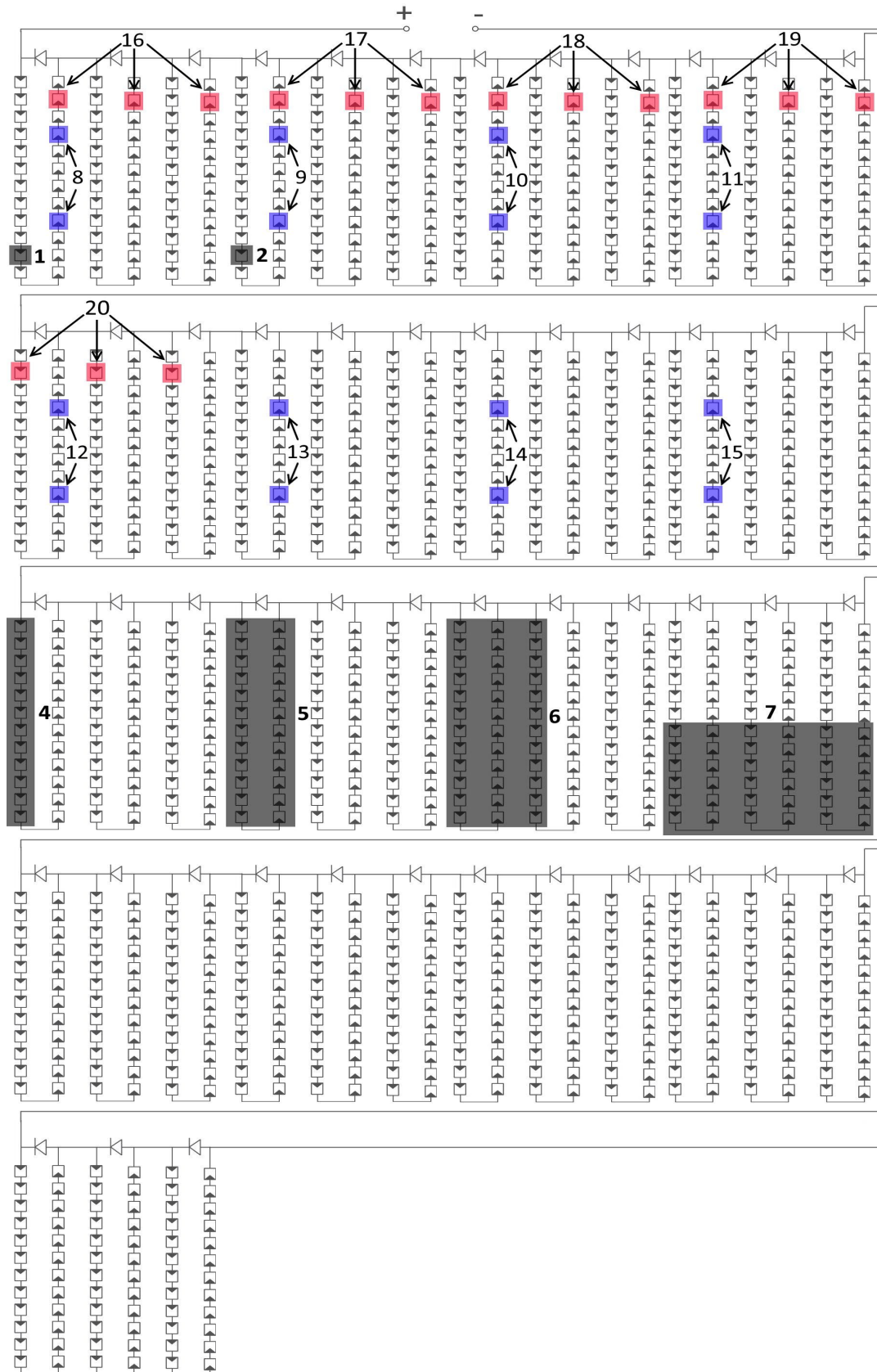


Obrázek 2.17 - pohled na zapojení střídače: vlevo zapojení 6 stringů, vpravo výstupní 3-fázové vedení.



Obrázek 2.18 - konfigurace zastínění č. 13

2.4.2. Konfigurace zastínění – měření na střídači



Obrázek 2.19 - Znárodnění postupného zákrytu modulů při měření výstupních parametrů střídače (17 modulů ve stringu)

Tabulka 2.10 – Výpis konfigurací zastínění při měření na střídači

# konfigurace	zastíněné oblasti	označení všech zastíněných oblastí dle schématu
1	bez zakrytí	-
2	zákryt 1 článku na 1 modulu	1
3	zákryt 1 článku na 2 modulech	1+2
4	zákryt 1 řady článků na 1 modulu	4
5	zákryt 2 řad článků na 1 modulu	5
6	zákryt 3 řad článků na 1 modulu	6
7	vertikální zákryt 1/2 modulu	7
8	zákryt 2 článků na 1 modulu	8
9	zákryt 4 článků na 2 modulech	8+9
10	zákryt 6 článků na 3 modulech	8+9+10
11	zákryt 8 článků na 4 modulech	8+9+10+11
12	zákryt 10 článků na 5 modulech	8+9+10+11+12
13	zákryt 12 článků na 6 modulech	8+9+10+11+12+13
14	zákryt 14 článků na 7 modulech	8+9+10+11+12+13+14
15	zákryt 16 článků na 8 modulech	8+9+10+11+12+13+14+15
16	zákryt 6 článků na 2 modulech	16+17
17	zákryt 9 článků na 3 modulech	16+17+18
18	zákryt 12 článků na 4 modulech	16+17+18+19
19	zákryt 15 článků na 5 modulech	16+17+18+19+20

Tabulka 2.11 – Hodnoty proudů jednotlivých stringů při měření na střídači

#	počet aktivních bypass diod	Výkon před střídačem [W]	Proudy generované jednotlivými stringy před střídačem					
			A1 [A]	A2 [A]	A3 [A]	A4 [A]	A5 [A]	B [A]
1	0	15470	4.875	4.86	4.892	4.891	4.891	4.858
2	1	15325	4.795	4.892	4.923	4.923	4.923	4.9
3	2	15049	4.208	5.114	5.13	5.145	5.145	4.974
4	1	15500	4.827	4.955	4.987	4.987	4.986	4.949
5	1	15436	4.811	4.987	5.019	5.018	5.018	5.007
6	2	15411	4.684	5.019	5.05	5.05	5.05	4.974
7	3	15401	4.621	4.987	5.019	5.018	5.018	5.007
8	1	15795	4.97	5.177	5.193	5.193	5.208	5.007
9	2	15874	4.843	5.098	5.13	5.129	5.129	5.115
10	3	15748	4.843	5.193	5.225	5.225	5.224	5.14
11	4	15628	4.478	5.225	5.241	5.256	5.256	5.115
12	5	15665	4.351	5.193	5.225	5.225	5.224	5.123
13	6	15649	4.288	5.272	5.288	5.288	5.288	5.173
14	7	15507	4.129	5.304	5.32	5.336	5.335	5.131
15	8	15382	4.034	5.368	5.384	5.399	5.383	5.148
16	3	15234	4.462	5.209	5.225	5.241	5.224	5.04
17	6	14662	3.732	5.272	5.288	5.304	5.288	5.024
18	9	13965	3.256	5.368	5.384	5.399	5.383	5.032
19	12	12945	2.145	5.368	5.399	5.399	5.383	5.09

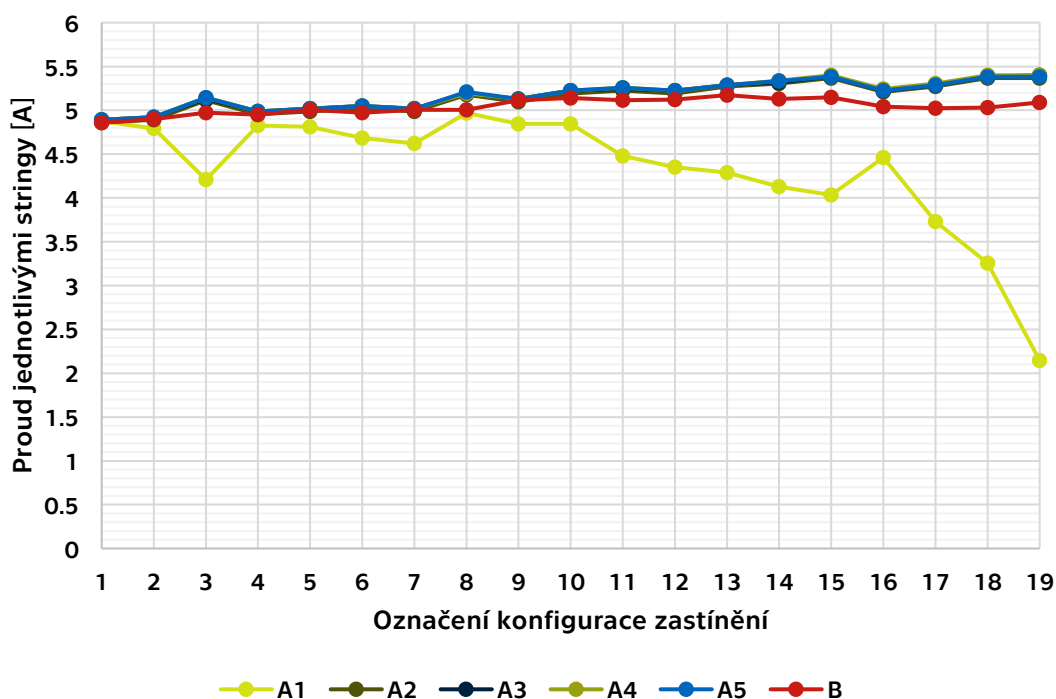
Tabulka 2.12 – Okamžik odečtu hodnot ze střídače pro různé konfigurace zastínění

# konfigurace	1	2	3	4	5	6	7
Čas měření	11:48:24	11:51:05	12:06:05	12:01:47	11:58:56	11:56:20	11:54:26
# konfigurace	8	9	10	11	12	13	14
Čas měření	12:24:01	12:31:52	12:34:33	12:37:21	12:38:42	12:40:32	12:44:25
# konfigurace	15	16	17	18	19		
Čas měření	12:46:16	12:11:38	12:16:09	12:20:48	12:19:09		

2.4.3. Naměřené hodnoty v grafech a tabulkách

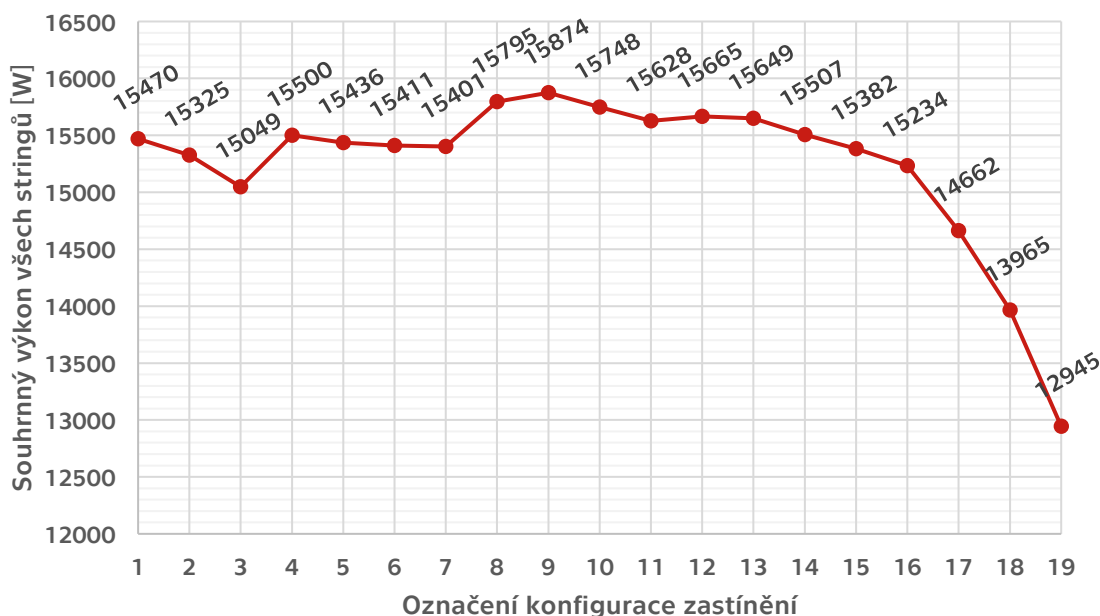
2.4.3.1. Hodnoty naměřené na vstupu střídače

Graf znázorňující proudy jednotlivými stringy na vstupu střídače. Stringy A1 až A5 sestávají ze 17 modulů, string B z 15 modulů (označení výrobce). Dohromady je tedy na vstup připojeno 100 modulů. Zastiňovány byly pouze moduly ve **stringu A1**.



Obrázek 2.20 - Proudové stringy před střídačem při různých konfiguracích zastínění

Graf změny souhrnného výkonu na vstupu do střídače. Součet výkonů všech stringů v závislosti na konfiguraci zastínění.

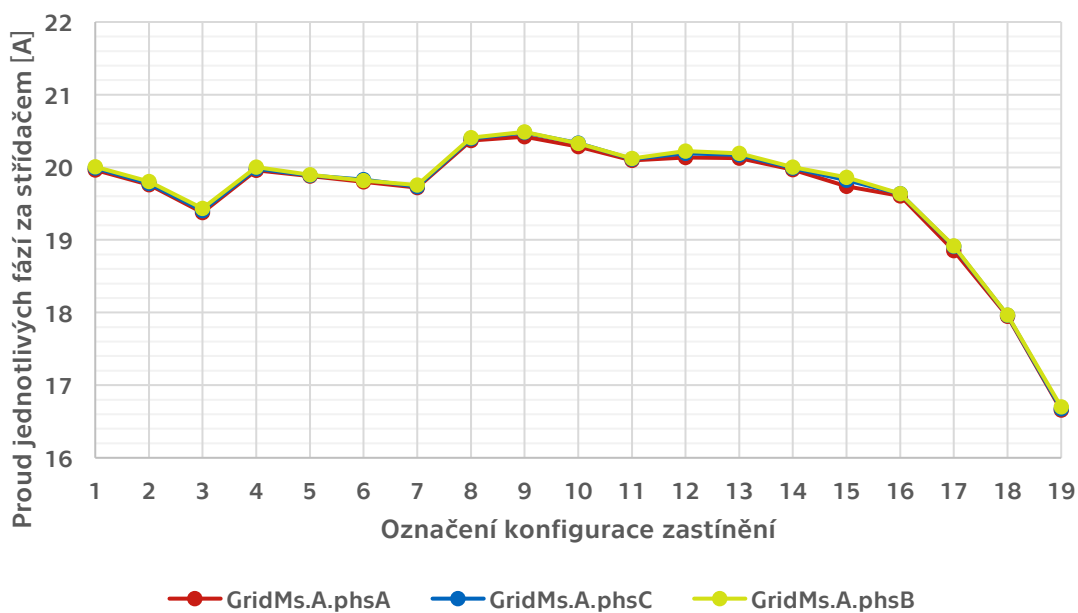


Obrázek 2.21 - Souhrnný generovaný výkon všemi stringy před střídačem při různých konfiguracích zastínění

2.4.3.2. Hodnoty naměřené na výstupu střídače

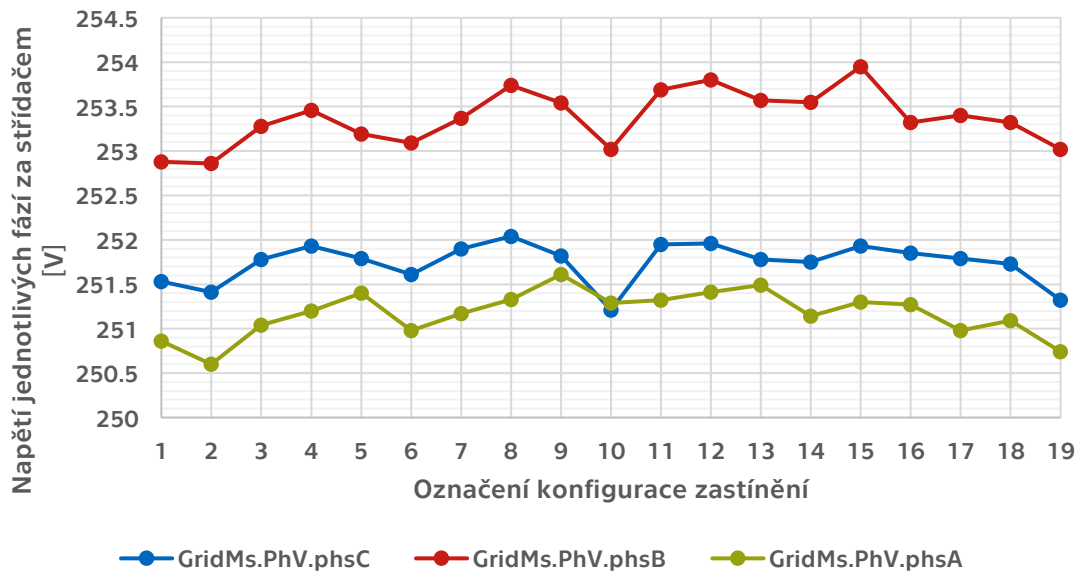
Všechny grafy v této podkapitole nemají nastaven, pro lepší rozlišení změn v hodnotách, počátek vertikální osy v nule.

Následující graf zobrazuje variace v proudech jednotlivými fázemi na výstupu střídače. Z grafu je zřejmé, že střídač pracuje dle specifikací a proudy pomocí vnitřních elektroniky nastaví na shodnou hodnotu, nezávisle na asymetrii proudů vstupních stringů.



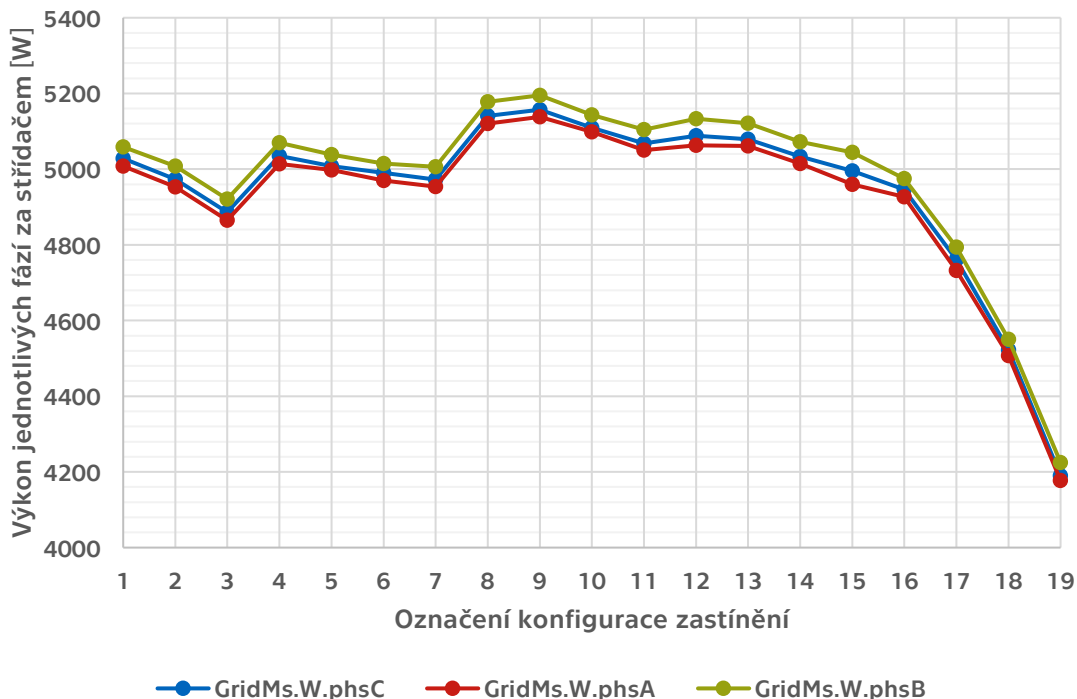
Obrázek 2.22 - Proudů jednotlivých fází za střídačem pro různé konfigurace zastínění

Graf zobrazující variace v napětí fází na výstupu střídače. Hodnoty se opět liší pouze zanedbatelně.



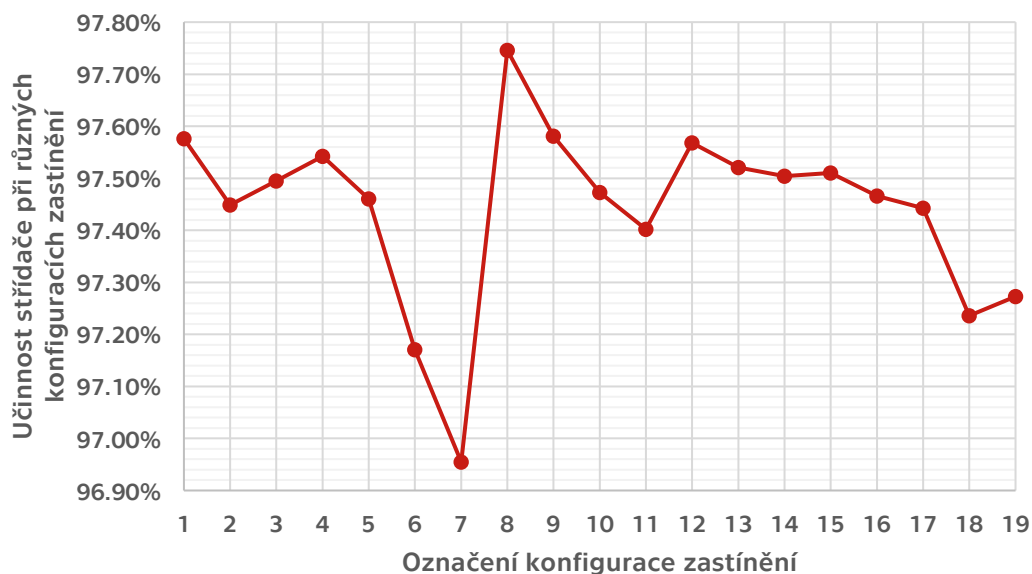
Obrázek 2.23 - Napětí jednotlivých fází za střídačem pro různé konfigurace zastínění

Graf porovnávající hodnoty výkonu jednotlivých fází na výstupu střídače. Stejně jako v případě výstupních fázových proudů je patrné, že střídač pracuje správně dle specifikací ve všech testovaných případech. Hodnoty výkonu ve všech 3 fázích jsou prakticky shodné.



Obrázek 2.24 - Výkony jednotlivých fází za střídačem pro různé konfigurace zastínění

Graf získaný porovnáním velikosti výkonu na vstupu a výstupu střídače v závislosti na konfiguraci zastínění (účinnost střídače).



Obrázek 2.25 - Účinnost střídače při různých konfiguracích zastínění

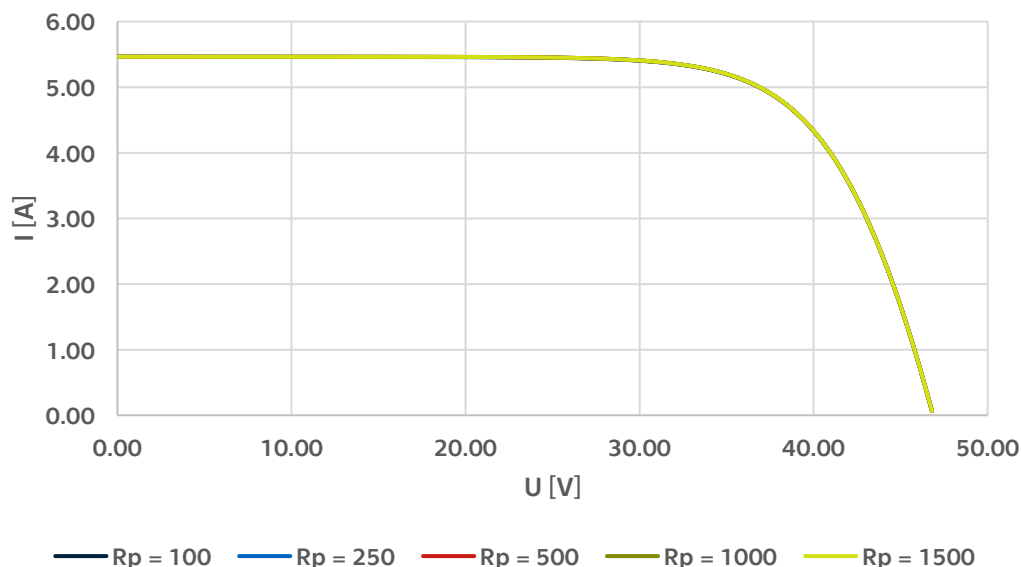
Účinnost střídače se pohybovala během celého měření mezi 96,95 – 97,75 %. K poklesu účinnosti pod 97 % došlo pouze při zákrytu dvou polovin modulů (konfigurace 7).

2.4.4. Věrnost vytvořeného LTspice modelu

Měřicí přístroj Metrel snímá k vykreslení charakteristiky celkem 136 bodů. Simulace LTspice byla nastavena pro vykreslování křivky s napěťovým krokem 1 V. Typicky bylo tedy získáno přibližně 600 bodů na charakteristiku (napětí 15 modulů ve stringu = cca 600 V). Dalším zvyšováním počtu měřených bodů již nedocházelo ke zdatelnému zpřesňování získaných průběhů.

Výsledky zkratového proudu I_{sc} dokonale souhlasí s experimentálním měřením. Jejich relativní odchylka dosahuje nevíše 0,61 %. Hodnoty napětí naprázdno U_{oc} jsou v případě LTspice modelu soustavně mírně vyšší než hodnoty měřené, což je pravděpodobně způsobeno nepřesností použitých rovnic z hlediska uvažování vlivu intenzity záření a teploty (Obrázek 1.7 a Obrázek 1.8).

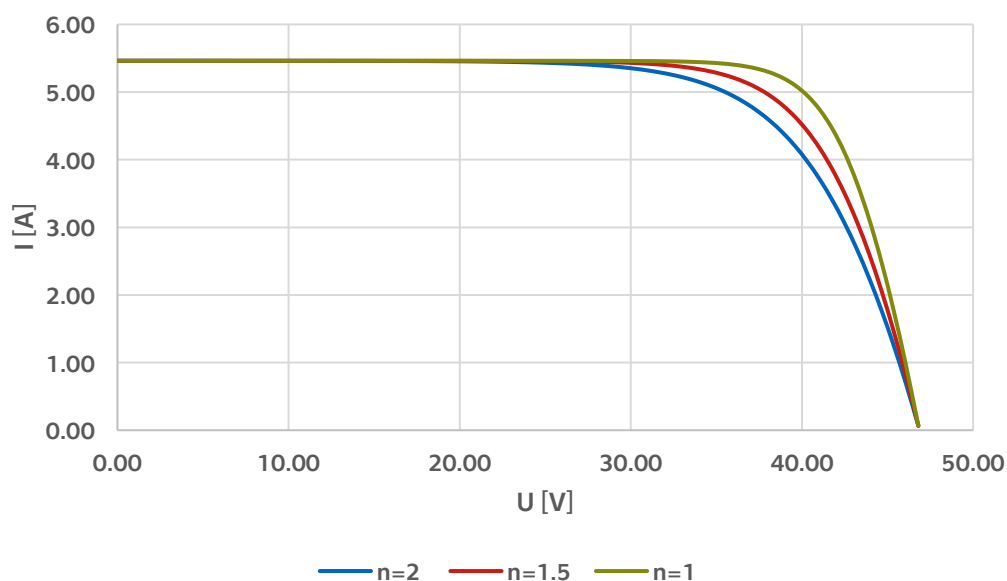
Při vytváření modelu bylo zjištěno, že změna hodnoty paralelního odporu R_p má pouze minimální vliv na tvar I-V charakteristiky modulu ve skupině případů zastínění, jež byly vyšetřovány. Ve fázi odladování byla zadávána řada hodnot R_p v rozmezí 100-1500 Ω . Charakteristiky v grafu splývají v jednu křivku (Obrázek 2.26).



Obrázek 2.26 – Závislost R_p na sklonu V-A charakteristiky při $n = 1,7$

Teoretickým předpokladem je změna sklonu charakteristiky v bodě I_{SC} (aby se tento sklon ztelně projevil, museli bychom nastavit hodnotu R_p nižší než 10Ω). [5] Proto bylo pro účely této diplomové práce rozhodnuto použít konstantní hodnotu paralelního odporu pro všechny případy simulací poškození, a sice 1000Ω .

Oproti tomu faktor ideality diody n má na výkon fotovoltaického modulu a na tvar I-V charakteristiky poměrně značný vliv. Změnou jeho hodnoty, se tupí úhel kolena charakteristiky. Čím více se hodnota faktoru ideality blíží 2, tím více se charakteristika linearizuje. Z toho vyplývá, že se zvyšujícím se n dochází ke značnému zhoršení fill factoru a účinnosti FV modulu. Napětí naprázdno U_{OC} a zkratový proud I_{SC} se se změnou faktoru ideality významně nemění (Obrázek 2.27).



Obrázek 2.27 – Závislost faktoru ideality diody na sklonu V-A charakteristiky

Hodnota faktoru ideality není výrobcem nikde udávána, proto byla pro simulaci opakovanými pokusy zvolena jako $n = 1,7$, čímž bylo dosaženo nejvěrnější shody s reálně měřenými charakteristikami.

Za účelem ověření kvality vytvořeného modelu byly v kapitole 2.3.3 porovnány výsledky získané simulací v LTspice v s výsledky získanými experimentálním měřením na FVE Onyx II.

V Tabulka 2.6 až Tabulka 2.9 jsou číselně vyjádřeny hodnoty základních sledovaných parametrů (I_{SC} , U_{OC} , P_{MPP} , I_{MPP} , U_{MPP} , FF_{string} a výkon na m^2 modulu). V posledním sloupci je číselně vyjádřená procentuální odchylka reálně získaných hodnot měřených přístrojem Metrel a hodnot vypočtených modelem. Maximální procentuální odchylky bylo dosaženo v případě zastínění pouze jedné dvojice článků na jednom modulu – případ A (Tabulka 2.6), a sice 4,5 % u hodnoty U_{OC} . Další nejvyšší relativní rozdíl je u napětí v bodě max. výkonu pro případ zastínění D (Tabulka 2.9). Z porovnání je patrné, že se výsledky simulace a experimentálně získaných hodnot poměrně přesně shodují a model je vhodně nastaven.

U všech případů zastínění lze pozorovat mírnou neshodu mezi křivkami – konkrétně posunu obou křivek získaných softwarem směrem k vyššímu výkonu. Sklon obou proudových i výkonových charakteristik si poměrně přesně odpovídá. Výchyly sklonu mohou být důsledkem malých neshod mezi hodnotami zkratového proudu každého modulu, jež vznikají již při jejich výrobě, či důsledkem poškození části článků (Obrázek 2.4). Neshoda sklonu charakteristiky se nejvíce projevuje u případě zastínění A (Obrázek 2.13). Změna velikosti paralelního odporu se v modelu prakticky neprojevuje, proto je ve všech případech považována jeho hodnota za konstantní (Obrázek 2.26). Rozdíl ve sklonu křivek v případě A by mohl být způsoben atmosférickými podmínkami v okamžiku snímání V-A charakteristiky přístrojem. Hodnota intenzity dopadajícího záření $G = 979 \text{ W/m}^2$ měla při tomto měření nejnižší hodnotu.

Moduly nebylo možno kvůli pohybu slunce po obloze a jejich měnící se povrchové teplotě měřit při naprosto stejných podmínkách. Je pravděpodobné, že pokud by byly testovací podmínky pro všechna měření zcela shodné, odchylky modelu od experimentálně získaných hodnot by nabývaly ještě nižších odchylek, než jak jsou prezentovány v rámci této práce.

Ve všech testovaných případech zastínění by měly dle teorie zareagovat, bypass diody. Na charakteristice v prvních třech případech, se vlivem zastínění poměrově malé části stringu modulů zlom ve výkonové křivce téměř neprojevuje. Reakce diod je velmi dobře patrná až v případě zastínění dvou třetin modulu přes všechny tři instalované bypass diody (strana 54). Na charakteristice je velmi dobře patrné "koleno", odpovídající teorii (Obrázek 1.19).

Diody použité v modelu byly převzaty knihovny modelů defaultně nainstalované spolu se softwarem LTspice, aniž by došlo ke změně jejich parametrů. K získání přesnějšího modelu, by bylo by nutné požádat výrobce modulu o charakteristiky bypassových diod a jednoduše do modelu vložit parametry jako Spice direktivu.

Výsledky modelu vykazují dobrou shodu mezi experimentálně naměřenými hodnotami a hodnotami simulovanými modelem, s maximální relativní odchylkou generovaného výkonu 2,58 %. Ověření modelu měřeného stringu modulů bylo tedy úspěšné a lze jej použít k simulaci dalších případů zastínění.

2.4.5. Diskuse výsledků měření na střídači

Všechny střídače v FVE byl stejného typu, s možností připojení 6 stringů modulů. Starší typy střídačů nebyly schopné řídit jednotlivé stringy odděleně, tudíž bylo nutné je instalovat v daleko vyšším počtu, či připojovat do stringu vyšší počet modulů. Moderní varianty střídačů již tuto vlastnost mají.

Měření na střídači probíhalo od 11:48 do 12:58. Během této doby intenzita záření dopadajícího na povrch modulu narostla z 951 W/m² na hodnoty přesahující 1010 W/m². Teplota povrchu modulů se také navýšila ze 38°C na 43°C. Změna *G* má výrazně větší vliv na tvar charakteristiky než změna *T*. Navýšení výkonu mezi měřeními 1 (varianta bez zastínění), které bylo měřené časově první a měřeními 8 a 9 (měřeno o 45 minut později), kdy byla zastíněna 1/3, resp. 2/3 modulu lze tedy vysvětlit výrazným navýšením hodnoty *G*.

Při analýze dat získaných měřeními na střídači byla pozornost soustředěna zejména na jeho chování v závislosti na asymetrii proudů na jeho vstupní straně. Ta byla simulována zastiňováním jednoho ze stringů obsahujícího 17 modulů (Obrázek 2.19). Výsledné změny proudů vstupujících do střídače je možno vidět v grafu na obrázku 2.20.

Při všech případech postupně se zvyšující zastíněné plochy výsledky souhlasí s teorií a výkon systému se snižuje (Tabulka 2.10).

Podkapitola 2.4.3.1 obsahuje dva grafy hodnot naměřených na vstupu střídače. Z grafu zobrazující proudy stringy na vstupu střídače (Obrázek 2.20) je vidět kolísání proudu ve větvi A1, která byla zastiňována. Zbylé větve ze skupiny A zřetelně reagují na snížení proudu v A1 mírným zvýšením proudu svého. Větve B tímto jevem ovlivněna není. Jelikož by dle teorie k tomuto jevu nemělo docházet u žádné z větví, je pravděpodobné, že je za něj zodpovědná vnitřní elektronika střídače. Efekt zvýšení proudu ostatními fázemi se navíc jeví být úměrně závislý na zastíněné ploše stringu. V případech kompletního zastínění (z pohledu bypass diod) tří a více modulů klesá proud stringu A1 neúměrně zastíněné ploše. Například pro případ 19 bylo zastíněno pouze 5/17 větve a proud poklesl ke 40% nominální hodnoty. Tuto skutečnost přisuzují neschopnosti střídače izolovat vliv stringů a udržet bod maximálního výkonu na optimální hodnotě. Dochází tak k jeho posunu a na systému vzniká výkonová ztráta větší, než by odpovídala zastíněné ploše.

Druhý graf (Obrázek 2.21) zobrazuje, ve shodě s teoretickým předpokladem, pokles výkonu, který je přímo úměrný počtu zastíněných částí modulů ve stringu (reagují bypass diody). K nejvyššímu úbytku výkonu dochází v případě 19, kdy je efektivně vyřazeno 5 celých

modulů. Na výkonové křivce je opět patrný nesoulad mezi zakrytým počtem modulů a skutečné výkonové ztrátě. Čím větší je počet zakrytých modulů (propustně polarizovaných bypass diod), tím rychleji klesá výkon. Tato závislost ovšem není vždy, dle měření, lineární.

Pro příklad se podívejme na konfigurace zastínění 13-14, 14-15 (propustná polarizace 6,7 a 8 bypass diod) a 17-18, 18-19 (propustná polarizace 9,12 a 15 bypass diod). U konfigurací 13-4 a 14-15 je s každou další konfigurací zastíňována 1/3 modulu navíc a výkon se mění, dle měření, v krocích -142 W a -115 W. Pro případ druhý (17-18 a 18-19) se výkon mění v krocích mnohem větších: -697 W a -1020 W. Přestože tentokrát je mezi konfiguracemi rozdíl zakrytí celého modulu navíc, výkonové ztráty jsou neúměrně vysoké. Znovu se tedy potvrzuje předpoklad, že střídač při výpadku příliš velké plochy modulů v jedné větvi nedokáže udržet systém v MPP a dochází k velkým výkonovým ztrátám.

Z výsledků měření je také patrné, že střídači činí větší potíže udržet nízkou výkonovou ztrátu při propustné polarizaci všech bypass diod na jednom modulu, spíše než aktivaci jedné diody na více modulech zároveň. Případy 8-15, kdy byly postupně zakrývány pouze třetiny modulů vykazují mnohem nižší, lineárnější pokles výkonu, než případy 16-19, kdy byly zakryty postupně 1-4 celé moduly. Pro příklad: Při konfiguraci č. 15, kdy bylo aktivních 8 bypass diod (1 dioda na každém z 8 modulů) byl naměřen výkon 15382 W. Při konfiguraci č. 17 (zakryty 3 diody na 3 modulech), klesl výkon na 14662 W, tedy o celých 720 W. Teoreticky by přitom měl být nižší pouze o cca 50 W.

V podkapitole 2.4.3.2 se nachází 4 grafy zobrazující průběhy U , I , P jednotlivých fází na výstupu střídače a jeho účinnost η . Průběhy v prvních třech grafech jsou pro všechny fáze de facto shodné, což poukazuje na správnou funkci střídače. Graf účinnosti sice vykazuje výkyv pro různé konfigurace až o 0,8 %, z našich dat však kvůli malému počtu experimentálních měření nelze usuzovat na korelaci mezi zastíněním a změnou účinnosti.

2.4.6. Reakce stringu na zastínění

Protože byla v rámci měření simulována zastíněním pouze menšího poškození lokálního charakteru, oblasti LMPP a GMPP se na získaných V-A charakteristikách vůbec neprojevují. Ke znatelnější deformaci charakteristiky dochází pouze v posledním případě D (Obrázek 2.16). Porovnáme-li všechny 4 testované konfigurace, je na nich, dle předpokladu, zřetelně vidět pokles výkonu se zvětšující se zastíněnou plochou. Pro první tři případy klesá výkon jak v případě modelu, tak v případě experimentálních měření.

Při porovnání případu D (zastínění 2/3 modulu) se zastíněním A (zastínění dvou FVČ), dochází k přemostění dvou bypass diod a k poklesu měřeného výkonu o 133,7 W (což odpovídá ztrátě výkonu 2/3 modulu). V případě D se v důsledku stínění objeví na charakteristice schod, začínající na 502 V o délce 28 V, což odpovídá napětí dvou třetin modulu, které jsou

zastíněny. Bypass diody jsou propustně polarizované a vedou rozdíl proudu, který zastíněný obvod nemůže generovat.

Hodnoty I_{sc} se s ohledem na zvětšující se zastíněnou plochou snižují jen o zlomky procenta. Kvůli měření při mírně odlišných podmínkách, kdy se intenzita osvětlení G pohybovala mezi 979 až 1018 W/m² a teplotě (39,4 – 42,4°C) a nedostatečně velké zastíněné ploše, nelze z charakteristik definitivně odvodit závislost zastínění na poklesu proudu nakrátko. Při výraznějším zastínění by samozřejmě dle teorie závislost měla být patrná (viz obrázek 1.7).

Pokles napětí naprázdno U_{oc} při porovnání prvních třech případů z tabulek patrný je, ovšem pouze u výsledků obdržených modelem. Při zastínění 1/3 modulu poklesne napětí o ~13 V, což představuje přemostění jednou bypass diodou. I v tomto případě absenci očekávaného jevu v datech experimentálního měření přisuzují změnám v iradiaci a teplotě modulů. Teoreticky by mělo vlivem vedení bypass diodou dojít k úbytku ~50 W výkonu. To představuje v reálných podmínkách pokles výkonu stringu modulů o 2,3 %. Procentuální nárůst v G mezi případy A a A+B činil 3,9 %. Ze závislosti na obrázku 1.8 a rovnice (14) lze usuzovat, že bypass diody sice zareagovaly, jejich vliv na hodnotu U_{oc} byl ovšem negován celkovým zvýšením výkonu stringu modulů vlivem nárůstu G .

Zhoršení tvaru V-A charakteristiky je nejlépe patrné z hodnot FF_{string} , které stabilně s přibývajícím zastíněním články klesají. Jev je patrný jak na naměřených, tak na simulovaných charakteristikách. Mezi nejmenším a největším zastíněním jde u reálných měření o pokles 3,71 %. V případě modelu v LTspice je pokles 3,07 %. Vzhledem k nedokonalosti testovacích podmínek a použitých rovnic se jedná o velmi dobrou shodu s teoretickými předpoklady. Stejný trend lze pozorovat při porovnání množství výkonu, generovaného z m² plochy modulu.

Zhodnocení a závěr

V praktické části práce byl vyhotoven model v softwaru LTspice, jehož shoda s experimentálně získanými hodnotami je velmi dobrá. Nejvýznamnější relativní odchylka od naměřených hodnot nastala v případě zastínění A (2.3.3.1), a sice v hodnotě napětí naprázdno U_{oc} o 4,5 %. Průměrná relativní odchylka modelu od naměřených hodnot dosahuje 1.63 %. To umožňuje jeho použití při studiu obdobných FV systémů.

Měření V-A charakteristik pro 4 konfigurace zastínění byly experimentálně ověřeny předpoklady chování systému v poruchovém stavu popsaném v teoretické části. Hodnoty získané modelem tyto předpoklady kopírují s větší přesností než hodnoty měřené. Tuto skutečnost přisuzují idealizovaným podmínkám výpočtu.

Model zhotovený v rámci této práce je velmi flexibilní. Byl navržen tak, aby bylo možno měnit libovolně parametry jakéhokoliv obvodového prvku, jakéhokoliv článku, v celém stringu 15 modulů. Jelikož model obsahuje $15 \times 72 = 1080$ článků, z nichž každý obsahuje v případě jednodiodového modelu 4 obvodové prvky a několik stavových konstant, výpočet jednoho stavu obvodu i na moderním high-end procesoru trvá průměrně 30 s, což je vzhledem k simulaci pouze 1/6 pole poměrně dlouhá doba. Pro model pole všech 100 modulů, zapojených na střídači by byla doba výpočtu pravděpodobně řádově vyšší. Z toho důvodu by pro softwarovou analýzu chování početnějších stringů bylo vhodnější použít model zanedbávající některé proměnné, nebo shlukování článků (např. přes každou bypass diodu) do větších celků a násobení jejich výstupních elektrických veličin. Tímto postupem by došlo sice k jisté degradaci kvality výsledků, ale výpočet by byl výrazně urychlen, jelikož by nebylo třeba, jako v našem případě, na každém modulu modelovat 3×24 článků, ale pouze 3×3 články, jejichž výstupní U a I by se jednoduše roznásobily 24.

Cílem měření na střídači bylo taktéž primárně ověření teoretických předpokladů o poklesu proudu, reakci bypass diod a snížení výkonu vlivem poruchového stavu simulovaného zastíněním částí modulů. Bylo zjištěno, že při vyšší výkonové ztrátě jednoho ze stringů střídač nedokáže anomálii vzniklou zastíněním zcela izolovat a dochází k posunu charakteristiky mimo bod MPP i u ostatních stringů, které nejsou dotčeny žádnou vadou. Vzniklý stav má za důsledek neúměrně rychlý pokles výkonu, který neodpovídá zastíněné ploše. Při zastínění 5 modulů ze 100 připojených na střídač došlo k poklesu výkonu o celých 18,5 %. Tento výsledek považuji, oproti teoreticky očekávanému poklesu o 5 %, za velmi významnou ztrátu.

Měření bylo prokázáno, že z hlediska střídače nejsou všechny konfigurace zastínění zakrývající ekvivalentní plochu z hlediska proudové (a tedy i výkonové) ztráty rovnocenné. Jak bylo popsáno v kapitole 2.4.5, částečné zastínění tří, šesti, či osmi modulů nepředstavuje zdaleka takovou výkonovou ztrátu, jako zastínění celého jednoho, dvou či tří modulů ve stringu. Pokles výkonu při postupném zakrývání 1/3 modulů je na rozdíl od zakrývání celých modulů poměrně lineární.

Z předchozích zjištění lze tedy vyvodit následující: v případě, že je poškození modulu lokálního charakteru a k jeho kompenzaci je třeba propustně polarizovat pouze jednu bypass diodu na každém postiženém modulu, není výkonová ztráta systému příliš významná. Pokud je modul poškozen natolik, že je zcela přemostěn všemi třemi diodami, je vhodné jej odstranit a vyměnit za jiný. Vzniklá výkonová ztráta mnohonásobně (cca 4x-6x, dle počtu poškozených modulů) převyšuje ztrátu předpokládanou.

Reference

- [1] I. E. Agency, „IEA - Preliminary Market report,“ 2019. [Online]. Available: <http://www.iea-pvps.org/?id=266>. [Přístup získán 10 4 2019].
- [2] B. Brooks, „The Bakersfield Fire: A Lesson in Ground-Fault Protection,“ 2011. [Online]. Available: <https://solarprofessional.com/articles/design-installation/the-bakersfield-fire-a-lesson-in-ground-fault-protection#.WcpmlcZrxph>.
- [3] Y. Zhao, FAULT DETECTION, CLASSIFICATION AND PROTECTION IN SOLAR PHOTOVOLTAIC ARRAYS, Massachusetts: Northeastern University Boston, 2015.
- [4] A. McEvoy, Solar Cells: Materials, Manufacture and Operation (2nd ed.), GB: Academic Press, 2013.
- [5] M. AZZOUZI, MODELING AND SIMULATION OF A PHOTOVOLTAIC CELL, Djelfa, Alžírsko: University of Djelfa, 2013.
- [6] J. Chocholáč, „VYUŽITÍ BYPASSOVÝCH DIOD VE FV PANELECH,“ VUT Brno, Brno, 2011.
- [7] A. C. S. Silvestre, „Effects of Shadowing on Photovoltaic Module Performance,“ *Progress in photovoltaics: research and applications*, č. 16, pp. 141-149, 2008.
- [8] L. Rada, „Vyhodnocování V-A charakteristik FV článků,“ v *Vyhodnocování V-A charakteristik FV článků*, Praha, ČVUT- FEL, 2010, p. 14.
- [9] S. R. K. Dirk C. Jordan, Photovoltaic Degradation Rates - An Analytical Review, Lakewood: National Renewable Energy Laboratory, 2012.
- [10] A. S. a. B. Harris, „Improving PV system Energy Yield with "Parallel" Wiring,“ [Online]. Available: [http://www.sustainableenergy.com/fileadmin/user_upload/product_information/Parallel Wiring for](http://www.sustainableenergy.com/fileadmin/user_upload/product_information/Parallel_Wiring_for).
- [11] S. K. Firth, A simple model of PV system performance and its use in, Elsevier - solar energy, 2009.
- [12] M. Calais, „Over-current protection in PV,“ v *ISES-AP - 3rd International Solar Energy Society Conference*, Sydney, 2008.
- [13] K.-H. Chao, „Modeling and fault diagnosis of a photovoltaic system,“ v *Electric Power Systems Research*, 2008.
- [14] W. L. Zhang Z, „ Study of bypass diode reliability under non-uniform irradiance distribution on PV module surface,“ *Acta Energiæ*, sv. 2, č. 37, pp. 355-360, 2016.
- [15] Y.-H. Liu, „A review of maximum power point tracking techniques for use in partially shaded conditions,“ *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, sv. 41, pp. 436-453, 2015.
- [16] A. Gupta, „A Power Quality Analysis Using Matlab Simulation Case Studies,“ v *Solar Photovoltaics Engineering*, Anchor Academic Publishing, 2016.

- [17] J. Freeman, „Working fluid selection and electrical performance optimisation of a domestic solar-ORC combined heat and power system for year-round operation in the UK,” *Applied Energy*, č. 186, pp. 291-303, 2017.
- [18] S. K. Firth, „A simple model of PV system performance and its use in fault detection,” *Solar Energy*, sv. 84, č. 4, pp. 624-635, 2010.
- [19] e. a. Mohammadnejad S., *Mathematical analysis of total-cross-tied photovoltaic array under partial shading condition and its comparison with other configurations*, Teheran: Iran University of Science & Technology, 2016.
- [20] I. A. Lesk, „Protected photovoltaic module: US Patent,” 1984. [Online].
- [21] M. J. Cohen, „Monolithic solar cell and bypass diode system: US Patents”. 1988.
- [22] R. Müller, „Solar cell comprising a bypass diode”. 2002.
- [23] J. R. Kukulka, „Solar cell with integrated bypass diode and method: US Patents”. 1997.
- [24] P. f. sunlight, „Solar bypass diode guide,” *Power from sunlight*, 20 9 2017. [Online]. Available: <https://www.powerfromsunlight.com/solar-bypass-diode-guide-this-is-what-you-should-know-about-solar-bypass-diodes/>. [Přístup získán 15 6 2019].
- [25] P. F. L. S. A. Pennisi S, „Low-power cool bypass switch for hot spot prevention in photovoltaic panels,” *ETRI Journal*, sv. 33, pp. 880-886, 2011.
- [26] L. M. D, „Reconfigurable electrical interconnection strategies for photovoltaic arrays: a review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, č. 33, pp. 412-426, 2014.
- [27] F. H. K. Blake, „The hot-spot failure mode for solar arrays,” 1969.
- [28] iLumen, „Which types of solar panel degradation exist?,” [Online]. Available: <https://www.ilumen.be/en/which-types-of-solar-panel-degradation-exist/>. [Přístup získán 1 5 2019].
- [29] G. & W. G. Oreski, „Aging mechanisms of polymeric films for PV encapsulation,” *Solar Energy*, sv. 6, č. 79, pp. 612-617, 2005.
- [30] C. Buerhop, „Reliability of IR-imaging of PV-plants under operating conditions,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, č. 107, pp. 154-164.
- [31] W. Dallas, „Resonance ultrasonic vibrations for crack detection in photovoltaic silicon wafers,” *Meas. Sci. Technol.*, č. 18, p. 852–858, 2007.
- [32] S. F. u. H. Eigenbrod, „Inline-Thermografie-System prüft Solarzellen,” v *Den Mikrorissen auf der Spur*, 2009, p. 54.
- [33] T. Fuyuky, „Photographic surveying of minority carrier diffusion length in polycrystalline silicon solar cells by electroluminescence,” v *Applied Physics Letters*, 2005, p. 96.
- [34] F. Kitiyanan, „Photographic diagnosis of crystalline silicon solar cells utilizing electroluminescence,” *Applied Physics A*, sv. 96, č. 1, pp. 189-196, 2009.

- [35] M. Köntges, Quantitative analysis of PV-modules by electroluminescence images for quality control, Hamburg, 2009.
- [36] M. Köntges, „The risk of power loss in crystalline silicon based photovoltaic modules due to micro-cracks,” v *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2011, pp. 1131-1137.
- [37] NFPA70, Article 690 - Solar Photovoltaic Systems of National Electrical Code, 2011.
- [38] M. Engelhardt, „LTSpice,” Linear Technology, 29 3 2018. [Online]. Available: <https://www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators/ltpice-simulator.html>. [Přístup získán 28 4 2019].
- [39] „Shockley–Queisser limit,” Wikimedia commons, 5 11 2018. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Shockley%E2%80%93Queisser_limit. [Přístup získán 29 11 2018].
- [40] „Multi-junction solar cell - Theoretical limiting efficiency,” Wikimedia commons, 1 12 2018. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Multi-junction_solar_cell#Theoretical_limiting_efficiency. [Přístup získán 3 12 2018].
- [41] A. C. S. Silvestre, „Effects of Shadowing on Photovoltaic Module,” *Progress in photovoltaics: research and applications*, pp. 141-148, 2008.
- [42] L. B. R. H. W. Amulya K. N. Reddy, „A Renewable-Intensive Global Energy scenario,” v *Renewable Energy: Sources for Fuels and Electricity*, London, 1994, p. 1118.
- [43] P. Pérez-Higueras, „High Concentrator PhotoVoltaics efficiencies: Present status and forecastP. Pérez-Higueras, E. Munoz ~ *, G. Almonacid, P.G. Vidal,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, č. 15, p. 1814, 2011.

Seznam obrázků

Obrázek 1.1 - Výsledek požáru 383 kW FVE, Bakersfield, CA, USA 2009 [2]	8
Obrázek 1.2 - Sběr dat ze sensorů umístěných na FVE. [3]	9
Obrázek 1.3 - Základní schéma zapojení fotovoltaického článku typu P.	11
Obrázek 1.4 - jednodiodový model FVČ. [6]	12
Obrázek 1.5 - Dvoudiodový model FVČ [8]	14
Obrázek 1.6 – a) V-A charakteristika ideálního FV článku a b) ideální P-V charakteristika FV článku.	16
Obrázek 1.7 - P-V křivka při změně intenzity dopadajícího záření.	17
Obrázek 1.8 - P-V křivka při změně teploty.	17
Obrázek 1.9 - Histogram míry degradace systémů s Si moduly. [9]	19
Obrázek 1.10 - Hot spot na FV článku [12]	21
Obrázek 1.11 - Mikro prasklina FV článku [13]	22
Obrázek 1.12 - Procentuální zastoupení poruch vzniklých na FV modulech po 3 letech provozu [14]	22
Obrázek 1.13 - a) Procentuální zakrytí FV modulu, b) P-V charakteristika pro každou výše ilustrovanou situaci (bez bypass diod)	23
Obrázek 1.14 - a) String 6 do série zapojených modulů, b) Efekt 25% zastínění, uniformně na každém modulu	24
Obrázek 1.15 - a) Bypass dioda zapojená paralelně s FV článkem, b) Série FV článků spojená anti paralelně s bypass diodou [23]	25
Obrázek 1.16 - a) Typický 60-článkový FV modul, b) Rozvodná krabice s bypass diodami [24]	26
Obrázek 1.17 - Modul rozdělený diodami do tří substringů	26
Obrázek 1.18 - Výsledky simulace při STC pro FV modul	28
Obrázek 1.19 - LMPP a GMPP pro 30% částečné zastínění se 3 bypass diodami připojenými k modulu	28
Obrázek 1.20 - Fotografie horní části FV modulu (pravo), Fotografie modulu v IR oblasti, na níž je patrný hot spot způsobený poruchou daného FVČ (vlevo) [27]	29
Obrázek 1.21 - V-A charakteristika zkoumaného modulu (vlevo), IR fotografie modulu za podmínek: $G = 690 \text{ W/m}^2$, a $T = 18^\circ\text{C}$ (vpravo) [29]	30
Obrázek 1.22 - a) Typická aparatura k pořizování EL snímků, b) Příklad EL snímku [32] FV článku [33], c) EL snímek modulu [35], d) závislost výkonové ztráty na počtu defektních článků v rámci modulu [35]	32
Obrázek 1.23 - Schéma FV systému zapojeného do rozvodné sítě o $m \times n$ modulech	33
Obrázek 1.24 - Upravené schéma FV systému v případě poruchy	34
Obrázek 1.25 - V-A charakteristika FV pole obsahujícího poruchu při normálních provozních podmínkách	35
Obrázek 1.26 – Zachování výkonu u FV systému v poruchovém stavu	37
Obrázek 2.1 – Základní jednodiodový model FVČ v LTspice	41
Obrázek 2.2 – Model jednoho FV modulu v LTspice	43
Obrázek 2.3 – Model 15 modulů ve stringu v LTspice	43
Obrázek 2.4 - Fotografie jednoho z modulů v testovaném stringu ilustrující stárnutí instalace (upraven jas, kontrast a ostrost pro přehlednost)	44
Obrázek 2.5 – Fotografie jednoho z 81 bloků v elektrárně: 5x17 + 1x15 modulů zapojených na jeden střídač, elektrárna Onyx II	46

Obrázek 2.6 - Použitý přístroj Metrel MI 3108	46
Obrázek 2.7 - Sensory pro měření teploty a intenzity záření	47
Obrázek 2.8 – Příklad zastínění při měření V-A charakteristik: varianta D	48
Obrázek 2.9 - Schéma zapojení 100 modulů na jeden střídač, s vyznačením testovaných stringů	48
Obrázek 2.10 - Grafy průběhů teploty a intenzity záření během měření	49
Obrázek 2.11 – Letecká mapa elektrárny Onyx II s vyznačenými místy měření (zdroj snímku: mapy.cz)	49
Obrázek 2.12 - Znázornění postupného zákrytu modulů při měření V-A charakteristik (15 modulů ve stringu)	50
Obrázek 2.13 - Porovnání V-A charakteristik reálně měřených hodnot a modelu v LTspice pro případ A	51
Obrázek 2.14 - Porovnání V-A charakteristik reálně měřených hodnot a modelu v LTspice pro případ A+B	52
Obrázek 2.15 - Porovnání V-A charakteristik reálně měřených hodnot a modelu v LTspice pro případ A+B+C	53
Obrázek 2.16 - Porovnání V-A charakteristik reálně měřených hodnot a modelu v LTspice pro případ D	54
Obrázek 2.17 - pohled na zapojení střídače: vlevo zapojení 6 stringů, vpravo výstupní 3-fázové vedení.	55
Obrázek 2.18 - konfigurace zastínění č. 13	55
Obrázek 2.19 - Znázornění postupného zákrytu modulů při měření výstupních parametrů střídače (17 modulů ve stringu)	56
Obrázek 2.20 - Proudové stringy před střídačem při různých konfiguracích zastínění	58
Obrázek 2.21 - Souhrnný generovaný výkon všemi stringy před střídačem při různých konfiguracích zastínění	59
Obrázek 2.22 - Proudové jednotlivých fází za střídačem pro různé konfigurace zastínění	59
Obrázek 2.23 - Napětí jednotlivých fází za střídačem pro různé konfigurace zastínění	60
Obrázek 2.24 - Výkony jednotlivých fází za střídačem pro různé konfigurace zastínění	60
Obrázek 2.25 - Účinnost střídače při různých konfiguracích zastínění	61
Obrázek 2.26 – Závislost R_p na sklonu V-A charakteristiky při $n = 1,7$	62
Obrázek 2.27 – Závislost faktoru ideality diody na sklonu V-A charakteristiky	62

Seznam tabulek

Tabulka 1.1 - 10 států s největším přírůstkem instalované kapacity FV elektráren za roky 2017-2018 [1]	7
Tabulka 1.2 - Typy poruch na FV instalacích	21
Tabulka 2.1 - Údaje o elektrárně	45
Tabulka 2.2 - Údaje o modulech	45
Tabulka 2.3 - Údaje o střídačích	45
Tabulka 2.4 - Technická data Metrel MI 3108	46
Tabulka 2.5 - Konfigurace zastínění použité při experimentálním měření přístrojem Metrel	48
Tabulka 2.6 - Odchylka modelu od reálného měření – případ A	51
Tabulka 2.7 - Odchylka modelu od reálného měření – případ A+B	52
Tabulka 2.8 - Odchylka modelu od reálného měření – případ A+B+C	53
Tabulka 2.9 - Odchylka modelu od reálného měření – případ D	54
Tabulka 2.10 – Výpis konfigurací zastínění při měření na střídači	57
Tabulka 2.11 – Hodnoty proudů jednotlivých stringů při měření na střídači	57
Tabulka 2.12 – Okamžik odečtu hodnot ze střídače pro různé konfigurace zastínění	58

Nomenklatura symbolů

A_{ill}	velikost ozářené oblasti [m^2]
$A_{celková}$	celková plocha FV článku [m^2]
e	elementární elektrický náboj $1,602 \cdot 10^{-19}$ [C]
E_x	intenzita dopadajícího záření [$\frac{W}{m^2}$]
I	generovaný proud [A]
I_d	proud diodou [A]
I_{D1}	závěrný proud diody D1 (rekombinace v kvazineutrálních oblastech) [A]
I_{D2}	závěrný proud diody D2 (rekombinace v oblasti prostorového náboje) [A]
I_{f1}	proud vstupující do poškozeného stringu [A]
I_{f2}	Proud vystupující z poškozeného stringu [A]
I_{fv}	proud přímo úměrný intenzitě dopadajícího záření [A]
I_g	proud zemním spojením [A]
I_{mpp}	proud v bodě max. výkonu [A]
I_{n1}	Proud vstupující do nepoškozeného stringu [A]
I_{n2}	Proud vystupující z nepoškozeného stringu [A]
I_{neg}	Proud negativní větvi [A]
I_{pos}	Proud pozitivní větvi [A]
I_R	proud paralelním odporem [A]
I_{sc}	proud nakrátko [A]
J_n	hustota el. proudu vlivem elektronů [$\frac{A}{m^2}$]
J_p	hustota el. proudu vlivem děr [$\frac{A}{m^2}$]
J_{PF}	proudová hustota zdroje proudu [$\frac{A}{m^2}$]
k	Boltzmannova konstanta $1,3806 \cdot 10^{-23}$ [$\frac{J}{K}$]
n, m	faktor ideality diody [-]
P	energie přeměněná na el. energii [W]
P_{dop}	energie dopadajícího záření [W]
P_G	výkon generovaný FV systémem [W]
$P_{poruchy}$	výkon zmařený v místě poruchy [W]
$P_{zážez}$	výkon vstupující do střídače [W]
$P_{ztráty}$	výkonové ztráty systému [W]
R_P	paralelní odpor článku [Ω]
R_S	sériový odpor článku [Ω]
S	plocha článku [m^2]
T	Termodynamická teplota [K]
U	napětí na svorkách článku [V]
U_{mpp}	napětí v bodě max. výkonu [V]
U_{oc}	napětí naprázdno [V]
U_T	tepelné napětí [V]
α_{rel}	koeficient vztahu proudu a teploty [-]
β_{rel}	koeficient vztahu napětí a teploty [-]