



Přírodovědecká
fakulta
Faculty
of Science

Jihočeská univerzita
v Českých Budějovicích
University of South Bohemia
in České Budějovice

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích
Přírodovědecká fakulta

Diagnostika fotovoltaických elektráren

Bakalářská práce

Tomáš Buček

Školitel: Ing. Václav Novák, CSc.

České Budějovice 2017

ZADÁVACÍ PROTOKOL BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: Tomáš Buček
(jméno, příjmení, tituly)

Obor – zaměření studia: MVT – Měřicí a výpočetní technika (KS)

Katedra/ústav, kde bude práce vypracovávána: Ústav fyziky a biofyziky

Školitel: Ing. Václav Novák, CSc., ÚAI PrF JU, +420 606 666 694, novak@lastech.cz
(jméno, příjmení, tituly, u externího š. název a adresa pracoviště, telefon, fax, e-mail)

Školitel – specialista, konzultant:
(jméno, příjmení, tituly, u externího š. název a adresa pracoviště, telefon, fax, e-mail)

Téma bakalářské práce: **Diagnostika fotovoltaických elektráren**

Fotovoltaické elektrárny se stávají běžnou součástí distribučních soustav. Po počátečním nadšení provozovatelé elektráren postrádají provozní diagnostiku. To je metodu sledování fyzikálních a statistických veličin, které jsou rozhodující pro ekonomický provoz. Zároveň je potřeba stanovit hranice pro servisní zásahy případně i ukončení provozu části nebo celé fotovoltaické elektrárny.

Cílem práce je najít parametry, které mají největší vliv na generovaný výkon. Dále sestavit diagnostické metody měření zhoršování kvality elektráren. Student se zaměří nejen na vlastní solární panely, ale i na měniče a související systémy. Dále stanoví hraniční podmínky pro užívání měničů s ohledem na normy kvality energetických sítí, zvláště v harmonickém zkruslení pomocí měření osciloskopem s následným vyhodnocením kvality výstupního napětí a proudu.

Bude provedeno ověření některé z diagnostických metod na vhodně zvolené malé FVE, případně na referenčním FV panelu v porovnání s teoretickými výpočty.

Základní doporučená literatura:

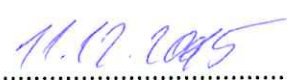
- Practical handbook of photovoltaics: fundamentals and applications. 2nd ed. Editor A McEvoy, T Markvart, Luis Castañer Muñoz. Waltham: Academic Press, c2012, xxiv, 1244 s. ISBN 978-0-12-385934-1
- Kolektiv autorů: Provoz distribučních soustav, ČVUT, Praha, 2011

Vedoucí práce: Ing. Václav Novák, CSc.,podpis: 

U externích vedoucích fakultní garant práce:podpis:

Vedoucí katedry/ústavu, kde bude práce vypracovávána:podpis: 

Případný souhlas vedoucího ústavu AV:podpis:

V Českých Budějovicích dne Podpis studenta: 

ABSTRAKT

Cílem práce je stanovit takové parametry fotovoltaické elektrárny, které mají největší vliv na generovaný výkon. Dále stanovit parametry, které mají vliv na zhoršování výkonu elektráren. Tyto parametry se budou týkat solárních panelů a elektrické zapojení fotovoltaické elektrárny jako celku včetně měničů. Pokusit se stanovit podmínky a účinnost již provozované fotovoltaické elektrárny.

KLÍČOVÁ SLOVA: fotovoltaická elektrárna, fotovoltaický panel, diagnostika, servisní měření

ABSTRACT

The main aim of this thesis is define parameters of photovoltaic power station that have affected electrical efficiency. Next task is concluded witch of parameters will affect deterioration of photovoltaic power stations. These parameters will be related with properties of photovoltaic cells and electrics circuits including features of inverters. Try to establish the conditions and the efficiency of photovoltaic power station that are under service diagnostics.

KEY WORDS: photovoltaic power plant, photovoltaic cell, diagnostics, service measurement

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Bibliografické údaje: Autor, (Buček T.) 2017: *Diagnostika fotovoltaických elektráren* (Diagnostics of photovoltaic power station, Bachelor Thesis, in Czech, -65p., Faculty of Science, The University of South Bohemia, České Budějovice, Czech Republic.

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. V platném znění souhlasím se zveřejněním své bakalářské práce, a to v nezkrácené podobě – v úpravě vzniklé vypuštěním vyznačených částí archivovaných Přírodovědeckou fakultou – elektronickou cestou ve veřejné přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách, a to se zachováním mého autorského práva k odevzdanému textu této kvalifikační práce. Souhlasím dále s tím, aby tutéž elektronickou cestou byly v souladu s uvedeným ustanovením zákona č. 111/1998 Sb. Zveřejněny posudky školitele a oponentů práce i záznam o průběhu a výsledku obhajoby kvalifikační práce. Rovněž souhlasím s porovnáním textu mé kvalifikační práce s databází kvalifikačních prací a systémem na odhalování plagiátů.

V Českých Budějovicích

.....
Tomáš Buček

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat Ing. Václavu Novákovi, CSc. za cenné rady a vedení při tvorbě bakalářské práce. Dále Petru Krýdlovi a Ing. Miroslavu Houfkovi, MBA za umožnění provedení měření FVE a poskytnutí rad a zkušeností z provozu a realizace FVE a Josefu Brouskovi za zapůjčení termovizní kamery a poskytnutí rad a zkušeností s jejím používáním.

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	8
SEZNAM TABULEK	9
SEZNAM GRAFŮ.....	10
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	11
1 ÚVOD.....	12
2 VYUŽITÍ OZE V ČESKÉ REPUBLICE.....	13
2.1 PODMÍNKY PRO VYUŽITÍ FOTOVOLTAIKY V ČR A VE SVĚTĚ.....	15
3 FOTOVOLTAICKÁ ELEKTRÁRNA.....	17
3.1 PRINCIP A FUNKCE FV ČLÁNKU.....	18
3.1.1 FOTOVOLTAICKÝ ČLÁNEK [6].....	18
3.1.2 KONSTRUKCE FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ [6].....	20
3.2 ROZDĚLENÍ FOTOVOLTAICKÝCH SYSTÉMŮ PODLE ZAPOJENÍ [6]	22
3.2.1 AUTONOMNÍ A HYBRIDNÍ SYSTÉMY [6]	22
3.2.2 SYSTÉMY PŘIPOJENÉ K ELEKTRICKÉ SÍTI (GRID-ON)	24
3.3 TECHNICKÉ ŘEŠENÍ FVE [6]	25
4 POSUZOVANÉ CHARAKTERISTIKY A CHYBY	27
4.1 A-V CHARAKTERISTIKA	27
4.2 VÝKON SOLÁRNÍHO ČLÁNKU	28
4.3 FILL FAKTOR A ÚČINNOST	28
4.4 PARAMETRY OVLIVŇUJÍCÍ ÚČINNOST FOTOVOLTAICKÉHO PANELU	29
4.5 DEFEKTY A CHYBY.....	30
4.6 INSTALACE A UMÍSTNĚNÍ FVE [12]	32
5 MĚŘENÍ VYBRANÝCH PARAMETRŮ FVE.....	33
5.1 TERMIVIZNÍ DIAGNOSTIKA	34
5.1.1 VLIV TEPLoty A SLUNEČNÍHO ZÁŘENÍ (KLIMATICKÉ VLIVY)	34
5.1.2 PARAMETRY OVLIVNĚNÉ TEPLOTOU PANELU.....	34
5.1.3 PROVÁDĚNÍ DIAGNOSTIKY.....	36
5.2 ANALÝZA PODLE PRŮBĚHU A-V CHARAKTERISTIKY	37
5.2.1 SÉRIOVÝ ODPOR.....	38
6 MĚŘENÍ A DIAGNOSTIKA – TECHNICKÝ POSTUP	39
6.1 MĚŘENÍ POMOCÍ TERMOKAMERY A VIZUÁLNÍ KONTROLA	39
6.2 MĚŘENÍ A-V CHARAKTERISTIKY	39
7 SERVISNÍ DIAGNOSTIKA – PRAKTICKÁ MĚŘENÍ	40
7.1 FVE 1 - ČESKÉ BUDĚJOVICE 5, J. ČAPKA	40
7.1.1 POPIS TECHNICKÝCH ÚDAJŮ FVE.....	40
7.1.2 TECHNICKÉ ZHODNOCENÍ UMÍSTNĚNÍ A ZAPOJENÍ FVE	41

7.1.3 TERMOVIZNÍ ANALÝZA	42
7.1.4 VÝKONOVÉ MĚŘENÍ	47
7.1.5 ELEKTRICKÉ ZAPOJENÍ FVE	51
7.2 FVE 2 - BOROVANY	52
7.2.1 POPIS TECHNICKÝCH ÚDAJŮ FVE	53
7.2.2 TECHNICKÉ ZHODNOCENÍ UMÍSTĚNÍ A ZAPOJENÍ FVE	54
7.2.3 TERMOVIZNÍ ANALÝZA	54
7.2.4 VÝKONOVÉ MĚŘENÍ	58
7.2.5 ELEKTRICKÉ ZAPOJENÍ FVE	61
8 ZÁVĚR	62
POUŽITÁ LITERATURA	65

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 2-1 Vývoj budování fotovoltaických systémů v USA [1]</i>	<i>13</i>
<i>Obr. 2-2 Vývoj budování fotovoltaických systémů v zemích EU [9]</i>	<i>14</i>
<i>Obr. 2-3 Předpokládaný vývoj instalovaného výkonu FVE [9]</i>	<i>14</i>
<i>Obr. 2-4 Výkon dopadajícího slunečního záření [2]</i>	<i>16</i>
<i>Obr. 2-5 Průměrná dopadající energie v Evropě [2]</i>	<i>16</i>
<i>Obr. 2-6 Průměrná dopadající energie v České republice [2]</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 3-1 Princip přímé přeměny energie slunečního záření na elektrickou s využitím fotoelektrického jevu [6]</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 3-2 Náhradní schéma fotovoltaického článku [6]</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 3-3 Využitelné spektrum záření pro články Si [6]</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 3-4 Struktura fotovoltaického článku [6]</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 3-5 Struktura fotovoltaického modulu z Si [6]</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 3-6 Blokové schéma systému Grid-off [6]</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 3-7 Hybridní fotovoltaický systém [6]</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 3-8 Zapojení systému pro vlastní spotřebu [6]</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 3-9 Zapojení systému pro dodávku do sítě [6]</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 3-10 Komponenty fotovoltaického systému [6]</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 4-2 Vliv teploty na výkon FV článku [6]</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 4-3 Vliv intenzity slunečního záření na výkon FV článku [6]</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 4-4 Teplotní maximum v místě přípojovací krabice [8]</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 4-5 Degradace EVA [8]</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 4-6 Termovizní snímek degradace EVA [8]</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 4-7 koroze na sběrnici [8]</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 4-8 Termovizní snímek zkorodované sběrnice [8]</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 4-9 Výnos energie v závislosti na sklonu a orientaci FV panelu [12]</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 5-1 Výnos energie v závislosti na sklonu a orientaci FV panelu [12]</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 5-2 Vliv úhlu měření na emisivitu a odrazivost skla [8]</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 5-3 Sériový a paralelní odpor [8]</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 5-4 části sériového odporu [8]</i>	<i>38</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 3-1 Účinnosti jednotlivých typů fotovoltaických článků [6]</i>	<i>21</i>
<i>Tab. 5-1 Projevy různých defektů [8]</i>	<i>37</i>
<i>Tab. 7-1 Technická specifikace panelů a střídače FVE 1, lokalita České Budějovice 5.....</i>	<i>40</i>
<i>Tab. 7-2 – Technická specifikace panelů a střídače FVE 2, lokalita Borovany</i>	<i>53</i>
<i>Tab. 7-3 Zaznamená data z FVE 2</i>	<i>58</i>

SEZNAM GRAFŮ

<i>Graf 7-1 Závislost výkon na intenzitě osvětlení z 24. 3. 2017</i>	<i>48</i>
<i>Graf 7-2 Závislost výkon na intenzitě osvětlení z 26. 3. 2017</i>	<i>48</i>
<i>Graf 7-3 Závislost výkon na intenzitě osvětlení z 27. 3. 2017</i>	<i>49</i>
<i>Graf 7-4 Závislost výkon na intenzitě osvětlení z 28. 3. 2017</i>	<i>49</i>
<i>Graf 7-5 Závislost výkon na intenzitě osvětlení z 29. 3. 2017</i>	<i>50</i>
<i>Graf 7-6 Závislost výkon na intenzitě osvětlení z 30. 3. 2017</i>	<i>50</i>
<i>Graf 7-7 Průběh části A-V charakteristiky FVE 2</i>	<i>59</i>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

$Q_{S \text{ den}}$	denní úhrn sluneční energie	[kWh·m ⁻²]
τ	poměrná doba slunečního svitu	[-]
τ_{skut}	skutečná doba slunečního svitu	[hod]
τ_{teor}	teoretická doba slunečního svitu	[hod]
$Q_{S \text{ den teor}}$	úhrnná sluneční energie dopadající na daný povrch	[kWh·m ⁻²]
$Q_{D \text{ den}}$	úhrn energie dopadajícího difuzního záření	[kWh·m ⁻²]
STC	standardní testovací teplota	[°C]
I	intenzita záření	[W·m ⁻²]
AM	Air Mass	[-]
U_{0C}	napětí na prázdno	[V]
I_{0C}	proud na krátko	[A]
U_{DC}	stejnosměrné napětí	[V]
I_{DC}	stejnosměrný proud	[A]
U_{AC}	fázové střídavé napětí	[V]
I_{AC}	fázový střídavý proud	[A]
P_{AC}	střídavý výkon	[W]
OZE	Obnovitelný Zdroj Energie	
Energiewende	Německé označení pro zavádění a využívání obnovitelných zdrojů v Německu	
FVE	Fotovoltaická Elektrárna	
EU	Evropská unie	
EVA	Ethylene–Vinyl Acetate	
NOCT	standardní provozní teplota (normal cell operating temperature)	
STC	standardní testovací podmínky	
In-situ	v terénu	

1 ÚVOD

Fotovoltaické elektrárny se stávají běžnou součástí distribučních soustav. Dalo by se říci, že každým dnem se energetika přibližuje drobnými krůčky k maximálnímu využití OZE. Velkým průkopníkem tohoto trendu je např. Německo s jeho *energie-wende*. Výroba elektřiny z těchto zdrojů je podporována EU – v dlouhodobé strategii pro obnovitelné zdroje. Zde byl navržen závazný cíl, aby do roku 2020 bylo vyráběno v EU 20 % spotřebované energie z OZE. K tomu se jako členský stát zavázalo i Česko. Největší zastoupení výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů je využívání vody, větru, slunce a biomasy. V případě biomasy se počítá s tím, že za svůj životní cyklus je nulová bilance produkce CO₂.

S nástupem obnovitelných zdrojů zažívá v současné době nezanedbatelný nástup i využívání tzv. alternativních zdrojů, které bývají někdy mylně označovány jako obnovitelné, jedná se například o tepelná čerpadla. V budoucnu budou právě možná alternativní zdroje energie zapojené do smartgrids společně s malými až středními zdroji OZE v decentralizovaném pojetí energetiky jedno z možných řešení, jak minimalizovat výrobu elektrické energie v tepelných elektrárnách spalující uhlí.

S ohledem na téma této práce se dále budu soustředit na fotovoltaické elektrárny. Česká republika zažila v minulých letech velký boom výstavby velkých FVE, řádově do výkonu 50 kW_p. To bylo způsobeno i možná nešťastně zvolenou a uchopenou podporou tohoto obnovitelného zdroje, která vlastně překroutila původní myšlenku a udělala z FVE v Česku „zlatý důl“. Tato podpora, která původně měla nastartovat rozvoj výstavby obnovitelných zdrojů, zejména FVE poskytla prostor pro různé spekulace, v některých případech docházelo i k podvodům, kdy se do sítě dodávala energie přes přípojnice fotovoltaické elektrárny, ale elektřina nebyla vyrobena ze slunce, pouze byla vykupována jako vyrobená elektřina z OZE.

V dnešní moderní energetice se vše točí kolem účinnosti, ať už přeměny jednoho druhu energie v druhou, hlavně tu elektrickou anebo distribuce vyrobené energie ke spotřebiteli. Každé procento účinnosti navíc se projevuje na návratnosti investice (zejména u velkých výkonů), příkladem může být výše uváděná podpora zelené energie ze strany státu. A proto je v zájmu všech provozovatelů výrobních zařízení, ať velkých energetických podniků, či soukromých vlastníků s pár solárními panely na střeše rodinného domku nebo na stodole, aby byla přeměna energie co nejúčinnější a tedy ekonomicky zajímavá. Další a o to více vznešenější dopad efektivního využívání OZE je, že se šetří životní prostředí pro další generace, ta však za investičním zhodnocením jaksí zaostává.

V současné době je tedy v České republice relativně velký počet FVE. Velké FVE jsou většinou vybaveny diagnostikou, která podává podrobné informace o výkonu elektrárny a další důležité informace vypovídající o stavu elektrárny. Malé FVE ve valné většině postrádají jakoukoliv provozní diagnostiku a jediné co o nich jejich majitel ví je, že na konci dne prodal do sítě určitý počet kWh elektrické energie, kolik spotřeboval pro vlastní potřebu a neví, s jakou účinností ji vyrobil či zda ji vyrábí efektivně. Tedy nesleduje žádné fyzikální veličiny, pomineme-li vyrobenou/prodanou energii a statistické veličiny, které jsou rozhodující pro ekonomický provoz. Pomocí takové diagnostiky je potřeba stanovit hranice pro servisní zásahy případně i ukončení provozu části nebo celé fotovoltaické elektrárny, případně nahrazení vadných částí FVE nebo provedení potřebných úprav.

Proto se tato práce zaměří na stanovení vhodného postupu diagnostiky malých FVE, který by obsahoval parametry, které mají největší vliv na generovaný výkon. Dále sestavit diagnostické metody měření zhoršování kvality elektráren. Je jasné, že FVE se neskládá pouze ze samotných solárních panelů, ale její součástí jsou i měniče a další systémy.

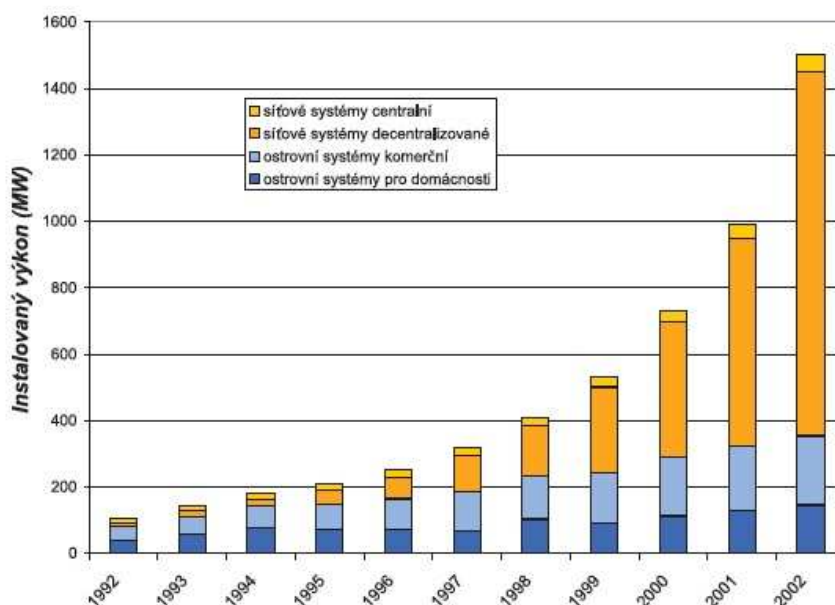
2 VYUŽITÍ OZE V ČESKÉ REPUBLICE

Jak již bylo řečeno v úvodu, mezi obnovitelné zdroje se řadí využívání energie z větru, slunce, vody, biomasy a termální energie. Pro získávání energie z tepla zemského jádra, tedy termální energie nejsou v Česku příliš vhodné podmínky, to neplatí např. pro Island a Nový Zéland. Co se týče energie vody, tak v ČR jsou vodní elektrárny všech druhů od malých průtočných nebo derivačních, tak větší jako je třeba Dlouhé stráně, která není úplně klasická vodní elektrárna (jedná se o přečerpávací elektrárnu), Dalešice, Lipno a mnohé další. Průtok v našich řekách však nepatří k těm největším a tomu odpovídají i výkony těchto elektráren. Co se týče využitelnosti dalších OZE se jako nejvýhodnější jeví využít energii ze slunce nebo větru, ale i pro tyto elektrárny je využití limitované slunečním zářením nebo povětrnostními podmínkami. Protože tématem této práce jsou FVE budu se dále zabírat pouze jimi.

Dobu minulých let lze charakterizovat jako období, kdy skončila éra ne-li levných energií, pak alespoň levnějších. Nejsledovanějším celosvětovým ukazatelem, vypovídajícím o cenách energií, je cena ropy. Ta z průměru 28,8 USD/barel za rok 2003 vystoupala v r. 2004 na 38,2 USD/barel a v r. 2005 až na 54,4 USD/barel. V roce 2006 cena dále rostla a atakovala hranici 77 USD/barel. V závěsu za ropou se zvyšovaly ceny zemního plynu a samozřejmě i ceny elektřiny.

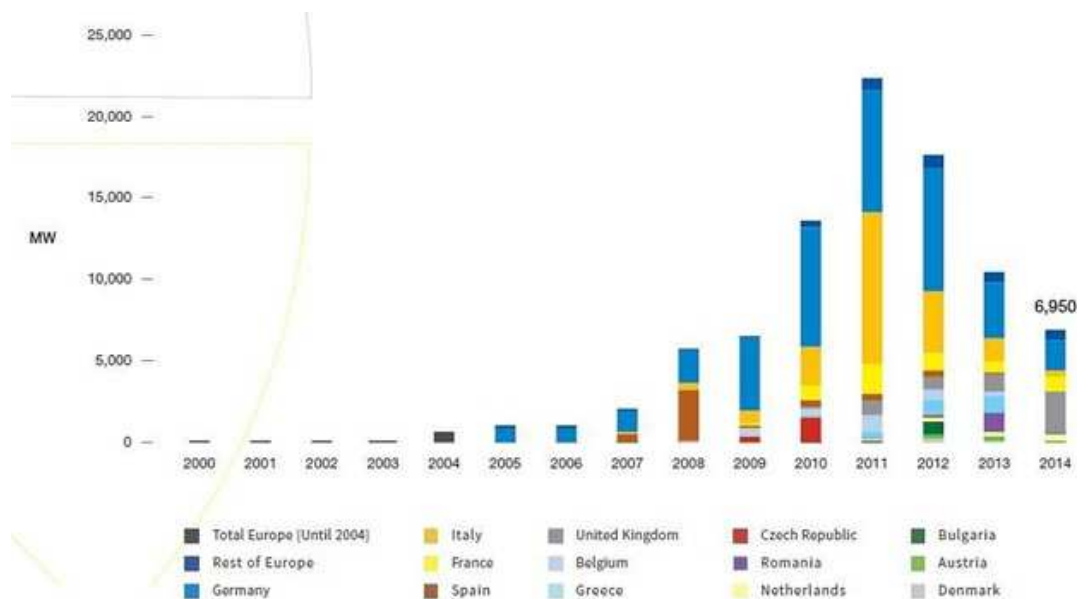
Kromě problému s růstem cen narůstá obava vyspělých průmyslových zemí ze závislosti na dovozech energetických surovin, které jsou v převážné většině uskutečňovány z problémových oblastí. U elektřiny se navíc projeví problémy v tranzitních přenosech, což jsme poznali i v České republice na vlastní kůži dne 25. 7. 2006, kdy ČEPS vyhlásil v české přenosové soustavě stav nouze.

Ze strategických a koncepčních záležitostí byly v uplynulých letech diskutovány „Zelené knihy EU“ o energetické účinnosti a o strategii pro udržitelnou, konkurenceschopnou a bezpečnou energii. V těchto a dalších dokumentech je přikládána velká důležitost rozvoji segmentu technologií na výrobu elektřiny, tepla a případně chladu z obnovitelných zdrojů. I když je nárůst využití obnovitelných zdrojů v některých zemích velký, přesto nejsou v průměru výsledky podle představ odborníků uspokojivé. [1]

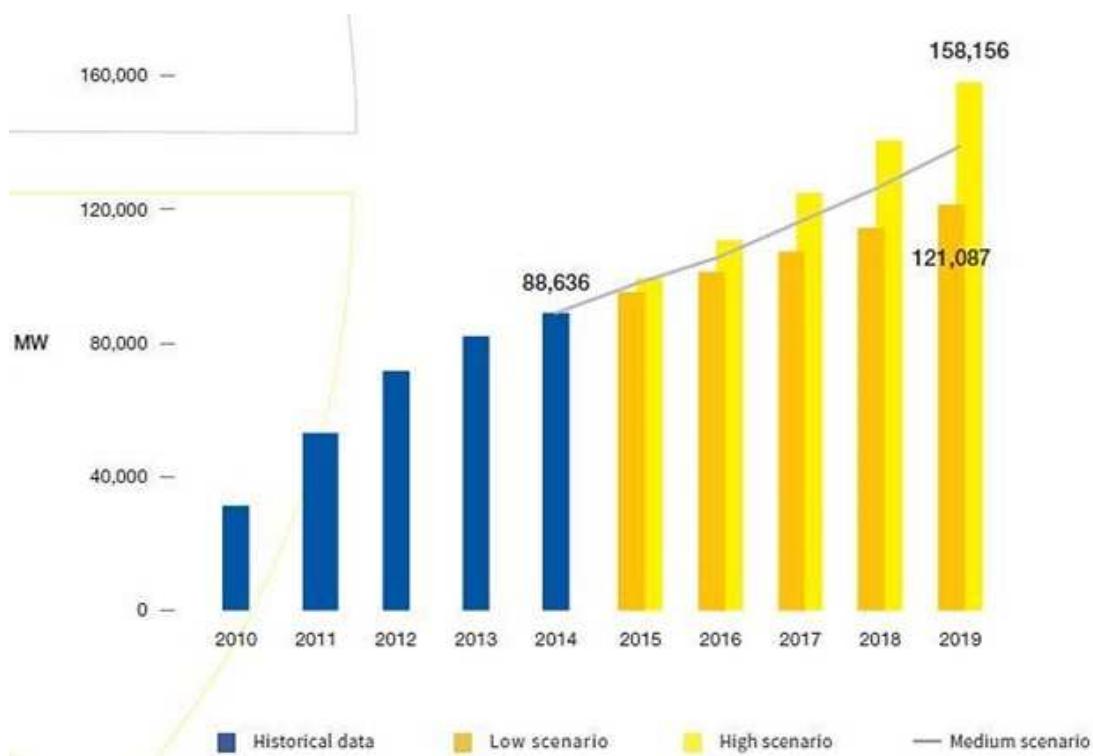


Obr. 2-1 Vývoj budování fotovoltaických systémů v USA [1]

Ačkoliv je kapitola věnována využití OZE v České republice poslouží pro dobrou představu vývoje využívání obnovitelných zdrojů celková situace v zahraničí, jak v EU, tak v USA. Na obrázku 2-1 je vidět vývoj FVE v USA, ze kterého je patrné, že se zde postupně upouští od instalací velkých fotovoltaických elektráren a přechází se k malým až středním decentralizovaným výrobnám. Pro srovnání je na obrázku 2-2 ukázán vývoj instalovaného výkonu FVE v zemích Evropské unie. Znatelně je zde vidět i doba kolem roku 2011, kdy byly zavedena podpora zdrojů (jiný název, tzv. feed-in tariffy), poté od roku 2012, kdy docházelo k ukončování podpory. Na obrázku 2-3 je prezentován předpokládaný vývoj instalovaného výkonu FVE.



Obr. 2-2 Vývoj budování fotovoltaických systémů v zemích EU [9]



Obr. 2-3 Předpokládaný vývoj instalovaného výkonu FVE [9]

2.1 Podmínky pro využití fotovoltaiky v ČR a ve světě

Intenzita slunečního záření na povrchu Země je množství sluneční energie v kW nebo kWh dopadající na m² povrchu Země. Tato intenzita je závislá na zeměpisné šířce. Vliv má i průměrné počasí v dané oblasti především množství oblačnosti. [3]

Na obrázcích 2-4 až 2-7 vidíme převzaté obrázky ze SolarGIS databáze pro celý svět až po samotnou Českou republiku.

$$Q_{S\ den} = \tau \cdot Q_{S\ den\ teor} + (1 - \tau) \cdot Q_{D\ den} \quad (2.1)$$

$$\tau = \frac{\tau_{skut}}{\tau_{teor}} \quad (2.2)$$

Rovnice 2.1 vyjadřuje denní úhrn sluneční energie dopadající na m² plochy. V rovnici 2.2 je poměrná doba slunečního svitu jako bezrozměrná jednotka. τ_{teor} je teoretická doba slunečního svitu, tedy když se uvažuje absolutní bezoblačnost. Jedná se o tabulkové hodnoty, dále je také důležité znát orientaci vůči slunci.

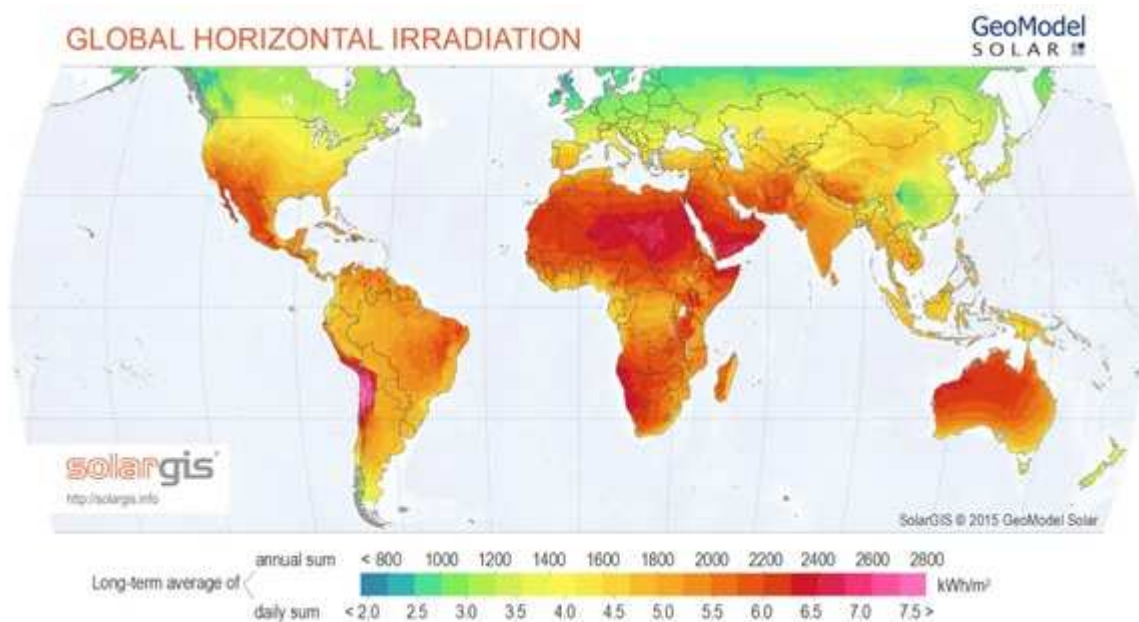
S ohledem na výše uvedené je nutné brát v potaz i tzv. solární konstantu (solární irradiaci). Ta je definována jako tak sluneční energie procházející kolmo na směr paprsků plochou 1 m² mimo zemskou atmosféru, v tomto případě ve střední vzdálenosti Země od Slunce. [11] Nad naší atmosférou tato konstanta činí 1 354 W/m² (hodnota se může lišit dle zdroje). Vlivem zemské atmosféry, kdy dochází k pohlcování a odražení paprsků, můžeme však tvrdit, že v různých místech je konstanta jiná a nelze ji považovat za konstantu. Pro vyjádření energie, která dozáhí až k zemskému povrchu (po průchodu atmosférou) používáme pojem - tok slunečního záření. Ten např. na rovníku dosahuje v průměru 1000 W/m², tento tok lze dále rozdělit zhruba následovně – 527 W/m² je ve formě IR záření, 445 W/m² je ve viditelném spektru a 28 W/m² celkového toku energie je UV záření.

Ačkoliv tvoří UV záření přibližně 7% dopadajícího záření na zemský povrch je škodlivé nejenom pro živé organismy, ale poškozují i fotovoltaické panely. Způsobuje degradaci polovodičů, i ochranných vrstev panelu.

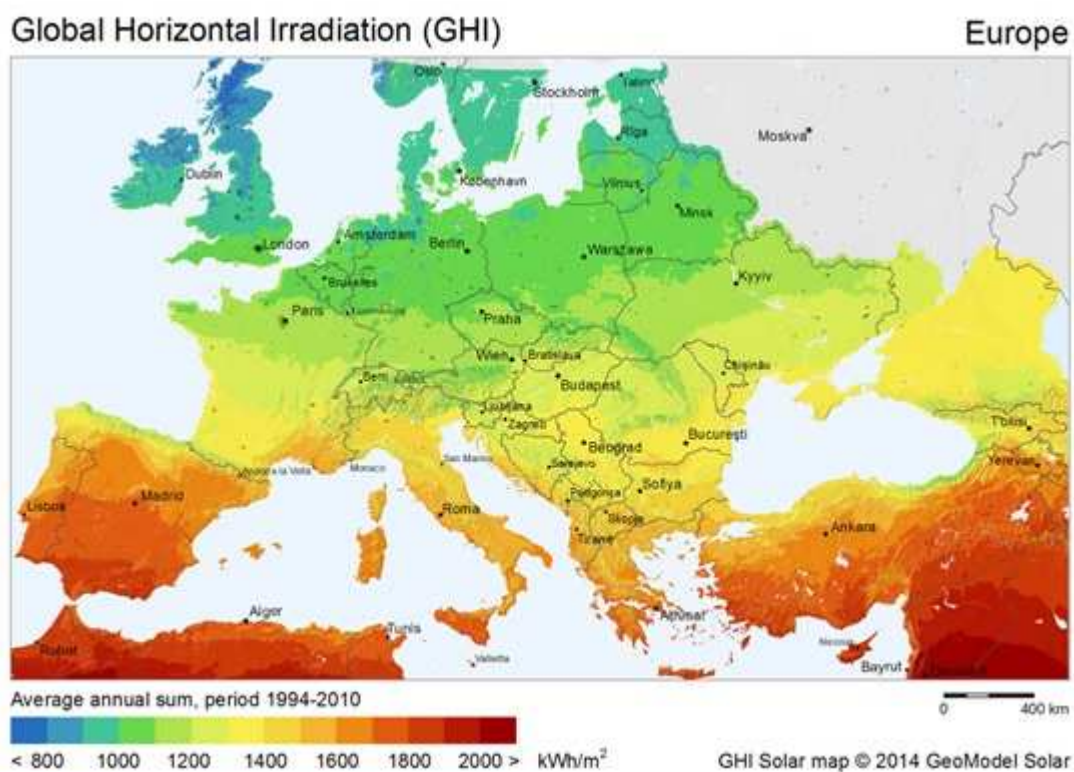
Další nutný údaj k ujasnění využití solární energie, jak pro výrobu elektřiny, tak pro ohřev vody apod. je počet slunečních dní v roce. Opět se jedná o tabulkovou hodnotu, např. pro České Budějovice odpovídá následujícím hodnotám v tabulce 2-1. Z toho plyne i další údaj o ročním využití FVE, které vidíme níže na obrázcích.

Tab. 2-1 Průměrné měsíční doby slunečního svitu ve vybraných lokalitách ČR [10]

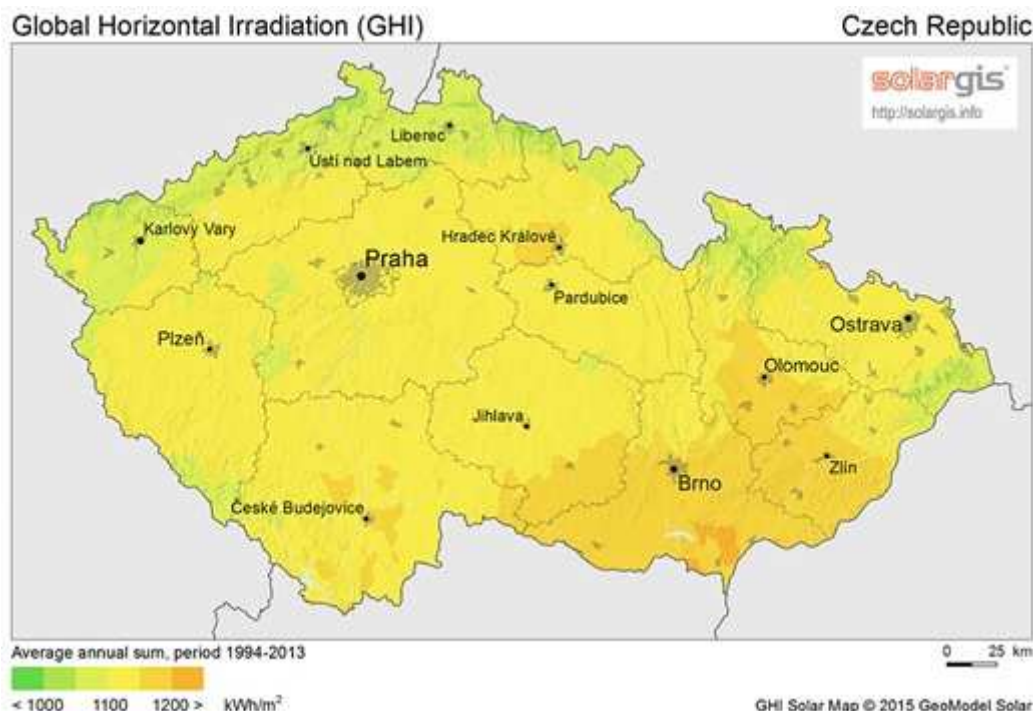
Město	Měsíc/počet hodin v měsíci												CELKEM [h/rok]
	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.	IX.	X.	XI.	XII.	
České Budějovice	41	60	124	137	195	197	181	199	138	97	55	43	1467



Obr. 2-4 Výkon dopadajícího slunečního záření [2]



Obr. 2-5 Průměrná dopadající energie v Evropě [2]



Obr. 2-6 Průměrná dopadající energie v České republice [2]

Na obrázku 2-6 je znázorněna situace v České republice, data vychází z dlouhodobých meteorologických měření. Dopadající sluneční záření na území ČR se pohybuje v rozmezí od 950 kWh/m² do 1400 kWh/m² za rok a to nejvíce v letních měsících. Tyto data se používají zejména při návrhu a ekonomickém hodnocení investice výstavby FVE.

3 FOTOVOLTAICKÁ ELEKTRÁRNA

Fotovoltaická elektrárna využívá přímou přeměnu energie slunečního svitu na elektrickou energii. K tomu slouží fotovoltaický panel, který se skládá z velkého množství fotovoltaických článků. Ty využívají k přeměně slunečního záření na elektřinu tzv. fotoelektrický jev. V současnosti je většina fotovoltaických článků založena na křemíku, i když se vyvíjejí a začínají využívat i články z jiných materiálů, např. teluridu kadmia¹ nebo CIGS² sloučenin.

Účinnosti fotovoltaických panelů se pohybuje od 6% až téměř k 50 % u nově vyvíjených článků. Ovšem účinnost nemusí být nejdůležitějším parametrem. [4]

Jedním z důležitých parametrů, dokonce vyšší než samotná účinnost je poměr účinnosti k ceně. V dnešní době nemůže najít uplatnění v reálném provozu vysoce účinný panel, pokud je jeho cena vysoká, v případě že neuvažujeme různé extrémní (resp. vědecké, vojenská a jiné) aplikace jako je třeba vesmírný výzkum apod.

Dalšími ovlivňujícími faktory, které mají dopad na výkon FVE je jejich samotná konstrukce. Dále rozhoduje její geografické umístění a podnebí, či povětrnostní vlivy v místě jejího situování.

¹ Sloučenina kadmia a telluria používána zejména pro speciální přechody PIN

² C – měď, I – indium, G – germanium, S – selen nebo síra

Fotovoltaické elektrárny se stavějí v podobě velkých systémů s megawattovými výkony, tak i v podobě malých střešních systémů u rodinných domů s řádově jednotkami kilowatt. [4]

Jednou z největších výhod FVE je, že se dají využít v decentralizovaných systémech výroby energie, například i s bateriovým uložištěm a v budoucnu ve SmartGrid řešeních. Velkým záporem je však závislost na počasí a na slunečním svitu. Tento problém by jednou vyřešilo vysokokapacitní ukládání el. energie například v bateriích, případně ve vodíkových článcích, ale tyto technologie jsou zatím na počátku vývoje a jsou drahé, tudíž pro masové nasazení neschopné života. Dále je obrovským problémem záloha jejich výkonu. V případě, že je ideální počasí a FVE vyrábí elektřinu se může zdát, že je do sítě dodáván požadovaný výkon, v extrémních případech ho může být i značný nadbytek. Pak, ale může docházet k přetokům energie (známe spíše v souvislosti s větrnými elektrárnami na severu Německa).

Jednoduše řečeno, nadbytek elektřiny z obnovitelných zdrojů v elektrizační soustavě vede v extrémních případech k záporným výkupním cenám elektřiny na burze. Opak je ale pravdou, protože v případě jakékoliv změny počasí nebo postupem denního cyklu, najednou začne potřebný výkon v síti chybět. Proto musí být veškerý instalovaný výkon OZE zálohovaný jiným zdrojem v naprosté většině elektrárnou, která spaluje fosilní paliva (plyn, uhlí, apod.), proto se také uvažuje o využití akumulace vyrobené elektřiny.

Pro představu o velikosti instalovaných fotovoltaických elektráren v Česku, je v současnosti největší elektrárna Ralsko s instalovaným výkonem 38,3 MW_e a Vepřek s instalovaným výkonem 35,1 MW_e. V současnosti se celkový instalovaný výkon v ČR pohybuje něco málo přes 2 GW. V našich podmínkách je koeficient využití výkonu většinou zhruba mezi 9 a 13 %. [4]

Pro srovnání, ve světě je celkový instalovaný výkon FVE více než 100 GW, mezi lídry se řadí země jako Německo, Itálie, Čína a USA.

3.1 Princip a funkce FV článku

První fotoelektrický jev byl pozorován při experimentu francouzského fyzika Becquerela roku 1839. Experiment byl prováděn pomocí kovových elektrod uložených v elektrolytu. O necelých 40 let později byl vyroben první článek ze selenu, v roce 1883 byl vyroben opět ze selenu americkým vynálezcem A. Frittem vyroben článek s účinností cca. 1 %, díky drasticky nízké účinnosti a vysokým výrobním nákladům byl tento článek používán k úplně jinému účelu a to ve fotoaparátech, jako světelný senzor. První fotoelektrický článek, podobný současným byl objeven až na začátku 20. století a dosahoval účinnosti cca. 5 %. Až v padesátých letech vznikl článek na bázi křemíku. Okamžitě se začal uplatňovat při vesmírném výzkumu. K výrobě elektřiny na Zemi začaly být fotovoltaické články používány až ke konci dvacátého století, ale stále bojovali s nízkou účinností, teoretické maximum bylo 31 % a výrobní náklady byly stále obrovské.

Fotoelektrický jev byl teoreticky popsán a vysvětlen až A. Einsteinem. Za jeho objev obdržel Nobelovu cenu.

3.1.1 Fotovoltaický článek [6]

Základním principem FV článku je fotoelektrický jev, při němž jsou elektrony uvolňovány z látky v důsledku absorpce elektromagnetického záření látkou. Absorpce je způsobena interakcí světla (fotony) s částicemi hmoty (elektrony a jádru) a mohou nastat tyto případy:

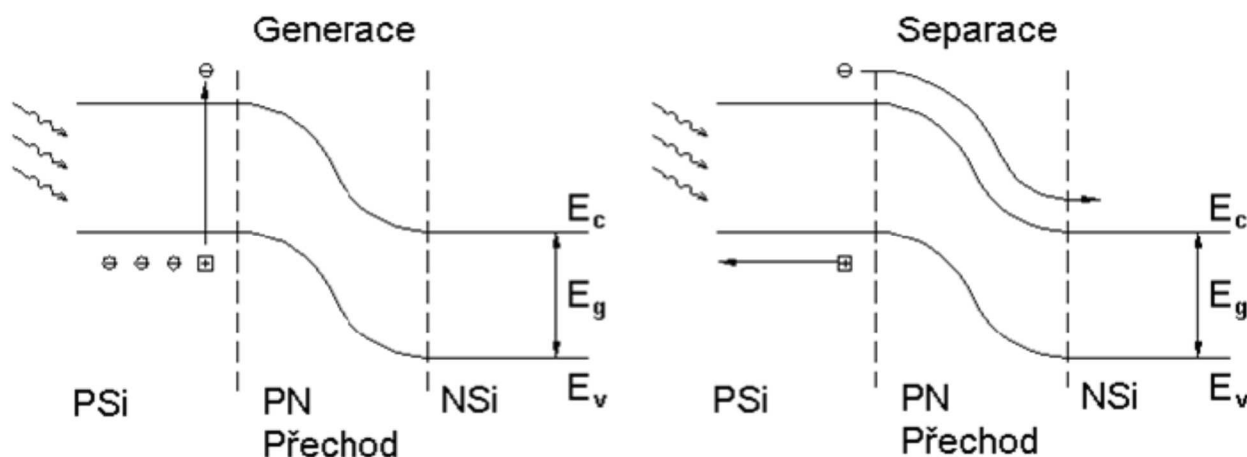
- Interakce částice s mřížkou
- Interakce s volnými elektrony
- Interakce s vázanými elektrony

Pro funkci FV článku je zásadní, aby foton ze slunečního záření uvolnil v látce elektron a vznikl pár elektron – díra. V kovech ovšem dojde k jejich okamžité rekombinaci, které je potřeba zabránit a vzniklý náboj tedy odvézt z článku. Pro tento účel se využívá polovodičů, ve kterých jsou elektrony a díry separovány vnitřním elektrickým polem PN přechodu.

Nejjednodušší fotovoltaický článek můžeme tedy popsat jako velkoplošnou diodu s jedním PN přechodem. Aby mohla fotovoltaická přeměna probíhat, musí být splněny následující podmínky:

- foton musí být pohlcen
- foton musí excitovat elektron do vyššího vodivostního pásu
- vzniklá dvojice elektron (-) – díra (+) musí být separována, aby se znovu nespojila
- oddělené náboje jsou následně odvedeny ke spotřebiči.

Na obrázku 3.1 je zobrazen základní princip funkce fotoelektrického jevu.



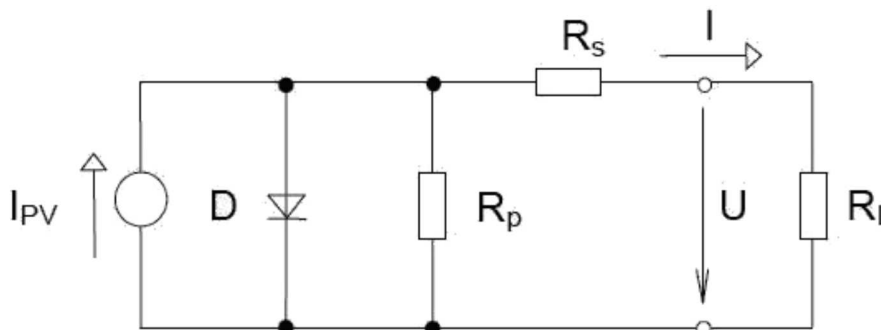
Obr. 3-1 Princip přímé přeměny energie slunečního záření na elektrickou s využitím fotoelektrického jevu [6]

PSi – polovodičový křemík typu P, NSi – polovodičový křemík typu N, EC – energie vodivostního pásu, EV – energie valenčního pásu

V ozářené oblasti PN přechodu jsou generovány nosiče, které následně difundují směrem k PN přechodu. Hustota proudu (J_{PV}) je tvořena nosiči, které byly zachyceny oblastí prostorového náboje. Nosiče, generované mimo místa přechodu PN musí k oblasti se silným elektrickým polem difundovat. Pokud zrekombinují dříve, než dosáhnou oblasti přechodu PN, neuplatní se při generaci fotovoltaického napětí.

Fotovoltaický (FV) článek je možno modelovat pomocí náhradního obvodu, znázorněného na obrázku 3-2. Ozářená oblast přechodu PN generuje proud o hustotě J_{PV} , přičemž se oblast typu P nabíjí kladně a oblast typu N záporně. Tím je přechod propustně polarizován a část generovaného

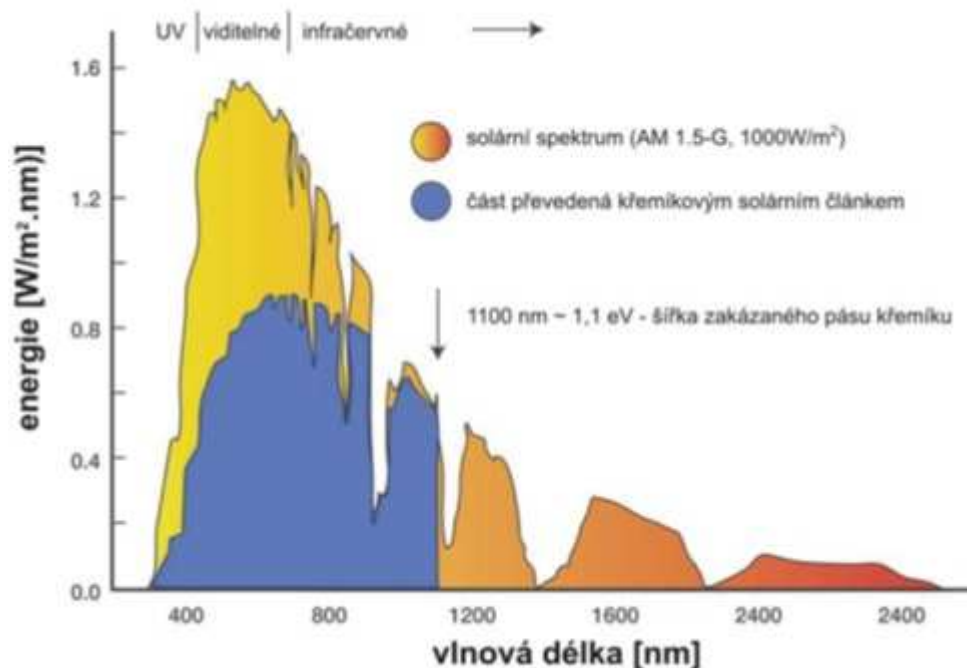
proudu teče zpět diodou D. Technologické nedokonalosti (mikrosvody) přechodu PN jsou modelovány svodovým odporem R_p , vliv odporu materiálu a proudových sběrnic je modelován sériovým odporem R_s . Výstupní napětí U na FV článku je o úbytek napětí na sériovém odporu nižší, než napětí U_j na diodě.



Obr. 3-2 Náhradní schéma fotovoltaického článku [6]

3.1.2 Konstrukce fotovoltaických článků [6]

Nejvyužívanějším materiálem pro výrobu fotovoltaických článků je křemík (Si). Vzhledem k šířce zakázaného pásu je u křemíku možno dosáhnout velmi vysoké účinnosti generace volných nosičů dopadajícím slunečním zářením. Zároveň u křemíku, jako základního materiálu pro mikroelektroniku, se podařilo velmi dobře zvládnout všechny technologické operace potřebné k vytváření struktur. Využitelné spektrum slunečního záření křemíkovým článkem je na obrázku 3 - 3.



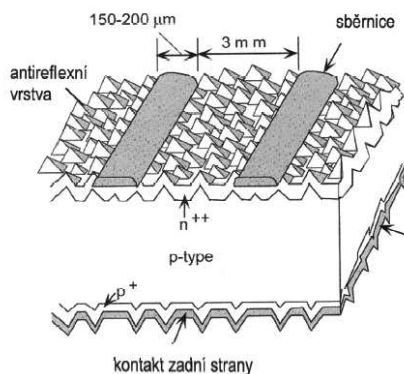
Obr. 3-3 Využitelné spektrum záření pro články Si [6]

Výchozím materiálem pro výrobu fotovoltaických článků z krystalického křemíku jsou křemíkové destičky (obvykle typu P) čtvercového tvaru o rozměrech až 200 x 200 mm a rezistivitě řádově jednotky Ωcm . Počátek výroby FV článků byl spojen pouze s monokrystalickým křemíkem. Potřeba snížení ceny vstupního materiálu vedla v sedmdesátých letech k vývoji multikrystalického křemíku. Tato technologie přispěla k úsporám materiálu a snížení investičních nákladů, na druhé straně náhodná orientace krystalických zrn neumožňuje texturaci povrchu alkalickým leptáním a hranice zrn zvyšují ztráty rekombinací. Vývojem technologie se podařilo značně přiblížit účinnost článků z multikrystalického křemíku účinnosti článků z křemíku monokrystalického (účinnosti jednotlivých typů fotovoltaických článků jsou v tabulce 3-1).

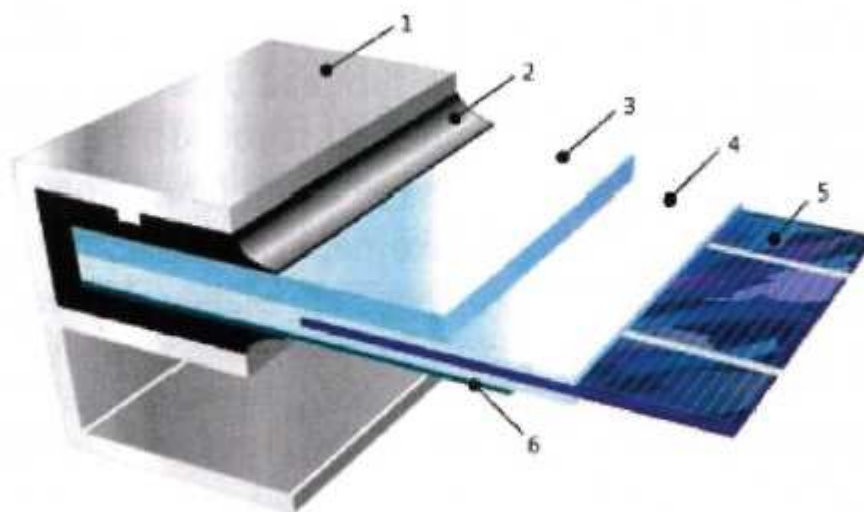
Tab. 3-1 Účinnosti jednotlivých typů fotovoltaických článků [6]

Typ solárního článku	Typický efektivita článku za běžných podmínek	Maximální měřená efektivita článku za běžných podmínek	Maximální naměřená hodnota článku v laboratoři
	[%]	[%]	[%]
Monokrystalický křemík	12 - 16	22	25
Multikrystalický křemík	11 – 14	16	20
Amorfní křemík	5 - 7	10	13
Telurid kademnatý	10	12	16

Z jedné křemíkové destičky je vyroben jeden fotovoltaický článek. Struktura běžného článku je schématicky znázorněna na obrázku 3-4. Aby byla dosažena vysoká životnost, musí se články chránit před vlivy okolního prostředí. Příklad konstrukce fotovoltaického článku z krystalického křemíku je na obrázku 3-5. Fotovoltaické články se vkládají do etylvinylacetátové fólie (EVA). Přední stranu článku tvoří vysoce průhledné, speciálně tvrzené sklo, aby byly články chráněny před vlhkostí, větrem, krupobitím (kroupy do průměru 25 mm) a dalšími povětrnostními vlivy. Současně má sklo propouštět na článek co největší množství slunečního záření. Zadní strana je uzavřena vícevrstvou plastovou fólií s vysokou pevností nebo další skleněnou vrstvou. Moduly jsou opatřeny hliníkovým rámem pro uchycení k nosným konstrukcím a na zadní stěně jsou opatřeny svorkovnicí s kabelovými vývody a překlenovacími diodami. Fotovoltaický modul je kompaktní celek s předepsanými mechanickými, optickými a elektrickými vlastnostmi.



Obr. 3-4 Struktura fotovoltaického článku [6]



1. hliníkový rám, 2. těsnění, 3. tvrzené sklo, 4. EVA, 5. fotovoltaický článek, 6. krycí fólie (tedlar)

Obr. 3-5 Struktura fotovoltaického modulu z Si [6]

3.2 Rozdělení fotovoltaických systémů podle zapojení [6]

Fotovoltaické systémy můžeme z hlediska aplikace rozdělit na tři základní typy:

- autonomní systémy,
- hybridní systémy s akumulací,
- systémy přímo spojené se sítí bez akumulace.

3.2.1 Autonomní a hybridní systémy [6]

Autonomní systémy (nebo také systémy Grid-off) se používají převážně v místech, kde není dostupná veřejná elektrorozvodná síť. Tyto systémy se skládají z fotovoltaických modulů, akumulátorové baterie a ochranného obvodu, který chrání akumulátorovou baterii před nadměrným vybitím nebo přebitím. Větší systémy mohou obsahovat i měnič napětí. Blokové schéma autonomního fotovoltaického systému je na obrázku 3-6.

Autonomní systémy využívají speciální akumulátorové baterie, konstruované pro pomalé nabíjení i vybíjení. Optimální nabíjení a vybíjení akumulátorů je zajištěno regulátorem dobíjení. K ostrovnímu systému lze připojit spotřebiče napájené stejnosměrným proudem (napětí systému bývá zpravidla 12 nebo 24 V), případně běžné síťové spotřebiče 230 V/~50 Hz napájené přes napěťový střídač. Tyto systémy mají uplatnění například jako zdroj elektrické energie pro chaty a další objekty, napájení dopravní signalizace, telekomunikačních zařízení nebo monitorovacích přístrojů v terénu, u zahradního osvětlení a světelné reklamy.



Obr. 3-6 Blokové schéma systému Grid-off [6]

Hybridní fotovoltaický systém je v podstatě kombinací klasické síťové elektrárny (Grid-on) a ostrovního systému (Grid-off). Oproti systémům Grid-on mají hybridní fotovoltaické systémy výhodu v maximálním využití vyrobené energie v místě výroby, ať už ve formě elektrické energie či pro přitápění, ohřev TUV, klimatizace, zavlažování, provoz bazénu nebo jiných předem určených spotřebičů, aniž by bylo zbytečně dodáno příliš mnoho energie do distribuční sítě.

Další nespornou výhodou hybridního fotovoltaického systému je již integrovaná funkce pro využití přebytečné energie ve výkonových špičkách, kdy inteligentní hybridní měnič již dnes dokáže přeměrovat přebytečnou energii v reálném čase či s řízeným zpožděním do Vámi předem určených, energeticky náročných spotřebičů. Příklad hybridního fotovoltaického systému je na obrázku 3-7.



Obr. 3-7 Hybridní fotovoltaický systém [6]

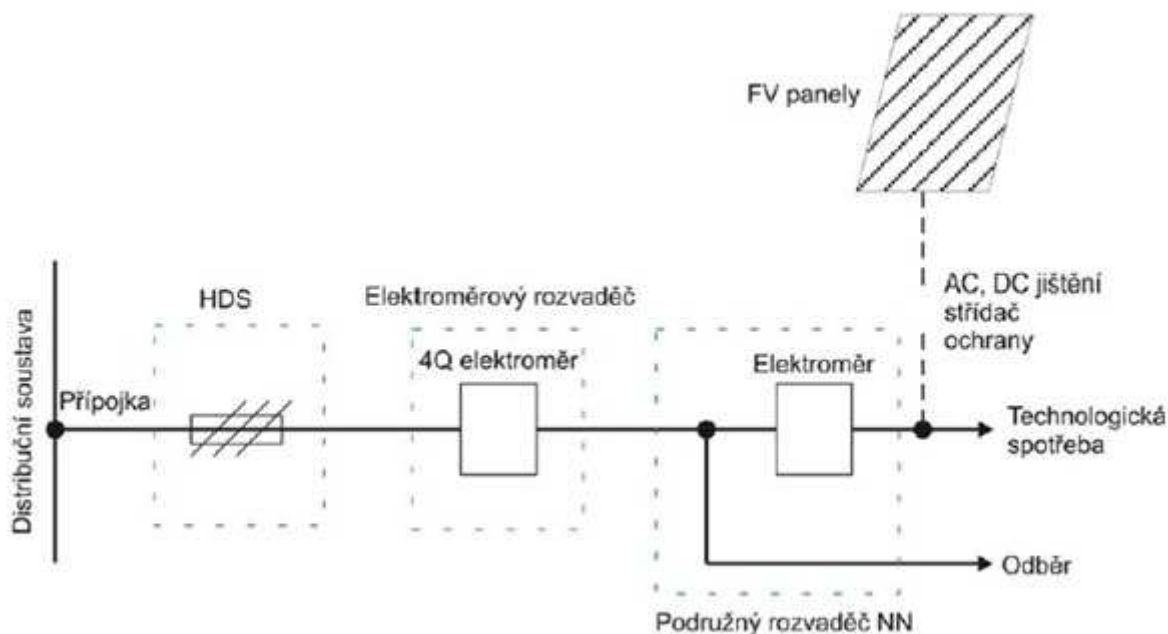
3.2.2 Systémy připojené k elektrické síti (Grid-on)

Výhodou systémů Grid-on je skutečnost, že veškerá vyrobená elektrická energie se na rozdíl od systémů Grid-off zpracuje. Tyto systémy se obvykle skládají z většího množství fotovoltaických modulů, měniče napětí (invertor nebo také střídač), zařízení pro měření a regulaci a síťové ochrany. Připojení fotovoltaických systémů do elektrizační soustavy může být provedeno ve dvou základních variantách, jak je zobrazeno na obrázku 3-8 a 3-9.

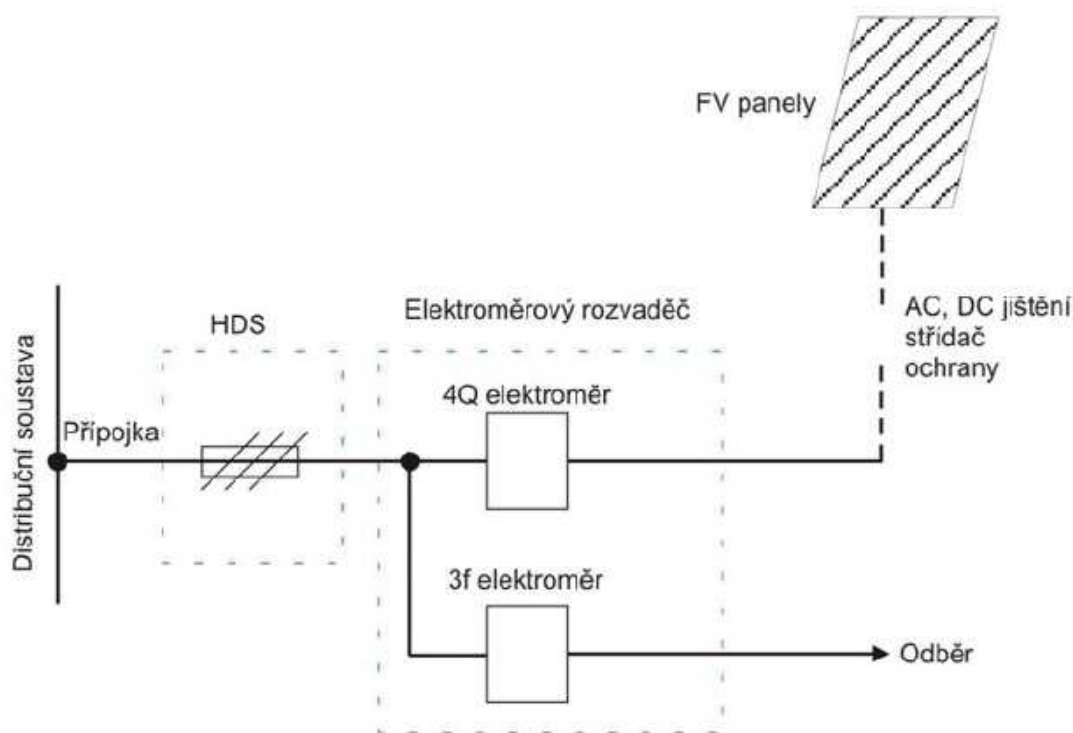
Obrázek 3-8 představuje systém zapojení v tzv. Zeleném bonusu. Za hlavní domovní skříní (HDS) je osazen čtyřkvadrantový elektroměr (4Q) a za ním je napojený domovní rozvod a elektrárna pomocí dalšího elektroměru. Toto zapojení se využívá v případech, kdy je převážná část vyrobené elektrické energie využita pro vlastní spotřebu objektu s instalovaným fotovoltaickým systémem.

Obrázek 3-9 představuje systém zapojení v tzv. výkupním tarifu. Fotovoltaická elektrárna je v tomto případě připojena mezi stávající elektroměr a hlavní domovní skříní (HDS) pomocí čtyřkvadrantového elektroměru. Tento systém zapojení se využívá v případech, kdy je veškerá vyrobená elektrická energie dodána výrobcem do elektrizační soustavy.

Na obytné domy se obvykle instalují systémy s výkonem v rozmezí 1 – 10 kW_p. Pro investory jsou však mnohem zajímavější systémy instalované na střechy větších bytových nebo nebytových komplexů, popřípadě instalace na volném prostranství (20kW_p až jednotky MW_p).



Obr. 3-8 Zapojení systému pro vlastní spotřebu [6]



Obr. 3-9 Zapojení systému pro dobavu do sítě [6]

Měření dodané a spotřebované elektrické energie je rozdílné pro systémy do 20 kW_p a nad 20 kW_p. U systémů do 20 kW_p se pro určení dobavy a spotřeby využívá přímý čtyřkvadrantový elektroměr. Pro systémy nad 20 kW_p je měření spotřeby a dobavy zajištěno následovně:

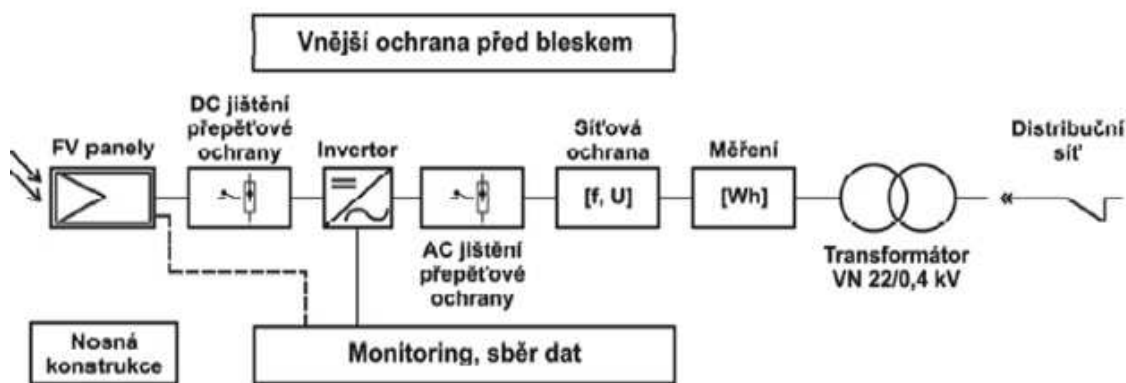
- nepřímé měření dobavy 4Q elektroměrem na NN straně transformátoru (do 600 kVA),
- nepřímé měření dobavy 4Q elektroměrem na VN straně transformátoru,
- samostatné měření spotřeby.

3.3 Technické řešení FVE [6]

Obecně lze říci, že téměř 80% celkových pořizovacích nákladů na fotovoltaický systém tvoří fotovoltaické panely, invertory a nosné konstrukce. Je tedy vždy velmi důležité najít takové technické řešení, které bude pro dané místo a typ instalace poskytovat maximální využitelnost pro investora. Jednotlivé komponenty fotovoltaické elektrárny jsou vidět na obrázku 3-10. Jednotlivé instalace můžeme rozdělit podle tří základních ukazatelů:

- instalovaného výkonu
 - systémy do 100 kW_p
 - invertory malých výkonů (1,5 – 8 kW)
 - systémy nad 100 kW_p
 - centrální invertory s výkonem 40 – 1000 kW
- nosné konstrukce
 - pevné (statické) systémy
 - natáčecí systémy

- jednoosé
- dvouosé
- umístění
 - střechy budov – pevné systémy
 - integrace do plášťů budov
 - instalace na volných plochách



Obr. 3-10 Komponenty fotovoltaického systému [6]

Výchozím bodem při návrhu fotovoltaické elektrárny je definice jejího využití. Při stanovení optimální velikosti instalovaného výkonu elektrárny velmi záleží, jaké jsou primární požadavky investora - jestli je hlavní požadavek "dostat na střechu co nejvíc" nebo například "optimalizovat elektrárnu tak, aby co nejvíc vyráběla pro vlastní spotřebu objektu". V prvním případě je maximální velikost elektrárny dána velikostí střechy a od roku 2011 také faktickým legislativním omezením, které dovoluje instalaci elektráren do velikosti 30 kWp. [11]

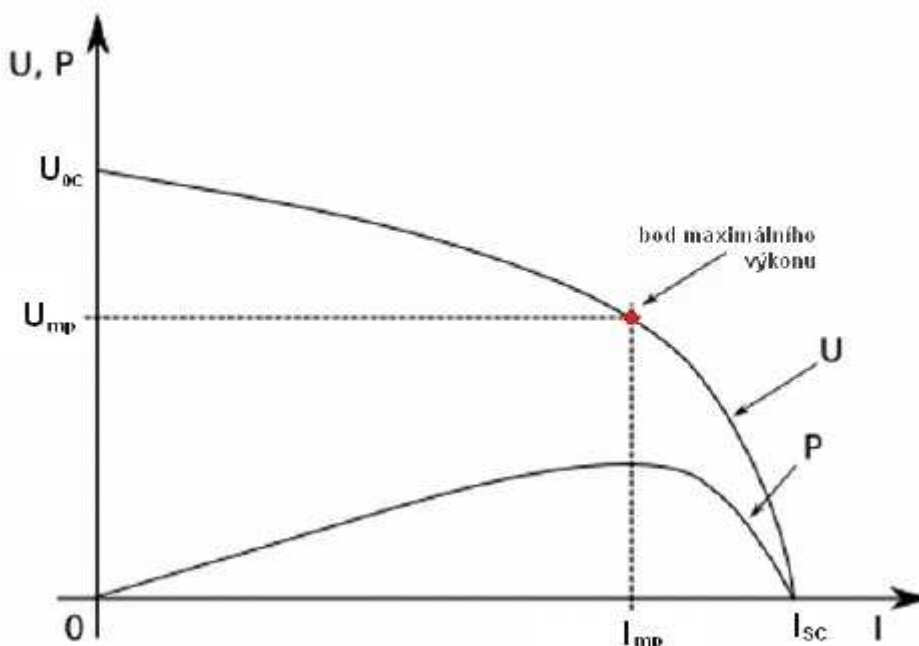
V případě optimalizace elektrárny na efektivitu spotřeby v místě výroby (a tedy i na nejlepší návratnost investice) je potřeba počítat s tím, že čím větší bude výroba (a tedy velikost) elektrárny v poměru ke spotřebě objektu, tím menší procento z elektřiny vyrobené elektrárnou bude v místě využito (přebytek pak bude dodán do distribuční sítě). V reálné situaci závisí také na typu spotřeby objektu - optimální je stav, kdy hlavní spotřeba v objektu je vyžadována v průběhu dne (např. školy, výrobní haly, administrativní budovy apod.). V případě rodinných domů, kdy je spotřeba směřována spíše do brzkých ranních a pozdních odpoledních a večerních hodin, je situace vyvážená výroby a spotřeby trochu komplikovanější. Tuto bilanci vylepšují víkendy, topení (např. tepelné čerpadlo, přímotopy), které pracují i přes den a další "denní" spotřebiče (např. klimatizace, ohřev bazénu apod.). Také je možno část spotřeby přesměrovat (posunutí startu myčky, pračky, apod.) a tak výsledný poměr zlepšit.

4 POSUZOVANÉ CHARAKTERISTIKY A CHYBY

Cílem práce je stanovit parametry které ovlivňují výkon FVE systémů. Tato kapitola se bude teoreticky věnovat posuzovaným parametrům, charakteristikám a fyzickým defektům a chybám, které budou posuzovány při samotné servisní diagnostice.

4.1 A-V charakteristika

Voltampérová charakteristika, viz obr. 4-1 je základní informací o účinnosti fotovoltaických článků. Hraniční veličiny na voltampérové charakteristice jsou napětí naprázdno (U_{OC}) a proud nakrátko (I_{SC}). Napětí naprázdno představuje maximální napětí na článku, kterého je možno dosáhnout v případě, že ke článku není připojen žádný spotřebič. Proud nakrátko představuje maximální proud (zkratový proud), který může solární článek při dané intenzitě slunečního záření dodávat. [6]



Obr. 4-1 Zatěžovací a výkonová charakteristika FV článku [6]

Proud maximálního výkonu – I_{MPP} (A)

Proud maximálního výkonu (Maximum Power Point) je hodnota proudu při maximálním výkonu. Bod MPP se udává prostřednictvím napěťové a proudové souřadnice voltampérové charakteristiky.

Napětí maximálního výkonu – U_{MP} (V)

Napětí maximálního výkonu (Maximum Power Point) je hodnota napětí při maximálním výkonu.

Tolerance výkonu – P_{mp} (%)

Tolerance výkonu nám udává, o kolik procent se může lišit výkon. Některé panely mají toleranci kladnou i zápornou. U kvalitních výrobků je tolerance kladná. Obvykle bývá 5 %.

4.2 Výkon solárního článku

Pro každý článek se dá stanovit na V-A charakteristice pracovní bod. Jedná se o takový bod, při kterém dosahuje článek nejvyššího výkonu. Tomuto bodu se také říká bod maximálního výkonu neboli MPP. Samotný výkon článku P závisí na teplotě článku, intenzitě ozáření a spektru světla (vlnové délce dopadajícího světla). Potom platí vztah,

$$P = U_{mp} \cdot I_{mp} \quad (4.1)$$

kde P je výkon, U_{mp} a I_{mp} jsou body podle obrázku.

Maximální výkon – P_{max} (W_p)

Maximální výkon s jednotkou W_p , kde index P znamená *peak*, tedy špičkový výkon při daných STC podmínkách. Je to typická tabulková hodnota fotovoltaického panelu, která se uvádí v *datasheetech*. Měření výkonů se provádí při standardních zkušebních podmínkách STC, tj. při ozáření 1000 W/m^2 , toto je přibližná hodnota při plné sluneční ozáření, při teplotě článku 25°C a hodnotě $AM = 1,5$ (Air Mass). Tato hodnota odpovídá intenzitě světla po průchodu 1,5 násobku tloušťky zemské atmosféry.

4.3 Fill Faktor a účinnost

Fill faktor určuje do jisté míry „elektrickou efektivitu“ fotovoltaického článku. Jedná se poměru mezi maximálním výkonem a U_{0C} a I_{0C} – tedy napětí na prázdko a proud na krátko.

$$FF = \frac{P_{mp}}{U_{0C} \cdot I_{0C}} = \frac{U_{mp} \cdot I_{mp}}{U_{0C} \cdot I_{0C}} \quad (4.2)$$

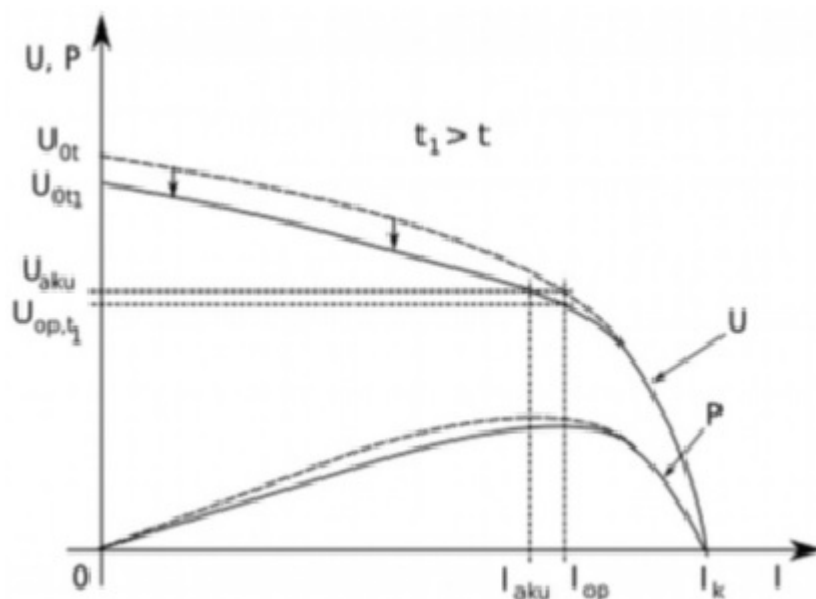
Účinnost FV panelu určíme podle vzorce 4.3 a je patrné, že se jedná o poměr maximálního výkonu v pracovním bodě článku a výkonu, který vyvolá dopadající sluneční záření.

$$\eta = \frac{U_{mp} \cdot I_{mp}}{P_{in}} \quad (4.3)$$

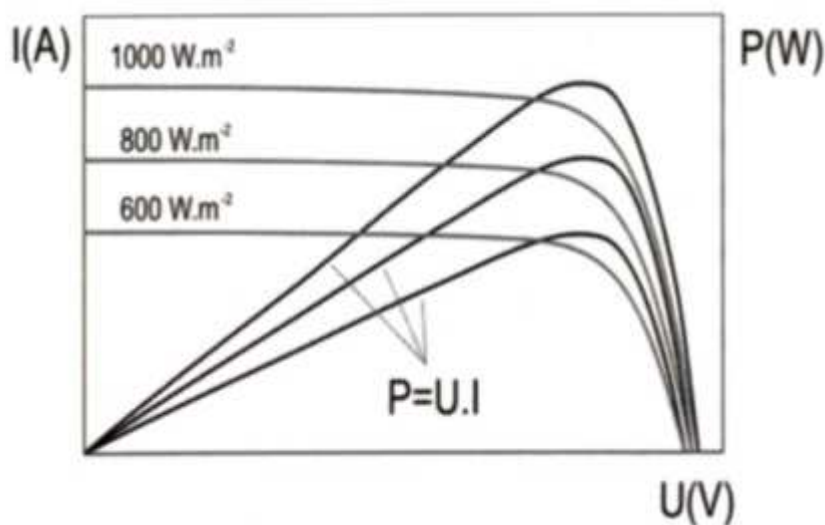
Výše uvedené charakteristické vlastnosti jsou stanoveny vždy za přesně daných podmínek. Jedná se zejména o $STC = 25^\circ\text{C}$, $I = 1000 \text{ W.m}^{-2}$ a při $AM = 1,5$. Jak již bylo dříve několikrát zmíněno, nejvíce VA charakteristiku ovlivňuje teplota článku a intenzita dopadajícího slunečního záření.

Vlivem zvýšené teploty se zvýší difúzní hodnota minoritních nosičů náboje a zmenší se energetická mezera polovodiče, což vede ke zvýšení fotoproudu. Tento nárůst je však zanedbatelný. Významnější je v tomto případě pokles napětí naprázdno U_{0C} . Při déle trvající sluneční intenzitě nebo zhoršených podmínkách chlazení článku (bezvětrí), kdy teplota vzduchu dosahuje 40°C dochází ke zvýšení povrchové teploty až na 80°C . Při takto vysokých teplotách

dochází ke změně elektrických vlastností článku, které vedou ke snížení zatěžovací charakteristiky směrem k nižšímu napětí (viz Obr. 4-2). Pokles optimálního napětí způsobí snížení dodávaného výkonu. [6]



Obr. 4-2 Vliv teploty na výkon FV článku [6]



Obr. 4-3 Vliv intenzity slunečního záření na výkon FV článku [6]

4.4 Parametry ovlivňující účinnost fotovoltaického panelu

Mezi tyto parametry patří zejména vnitřní odpor R_m , který způsobuje nežádoucí úbytek napětí a je dán vztahem

$$R_m = \frac{U_m}{I_m} \quad (4.4)$$

dále je důležitým parametrem tzv. reflexivita, která vychází z indexu lomu daného polovodiče, jedná se o vztah

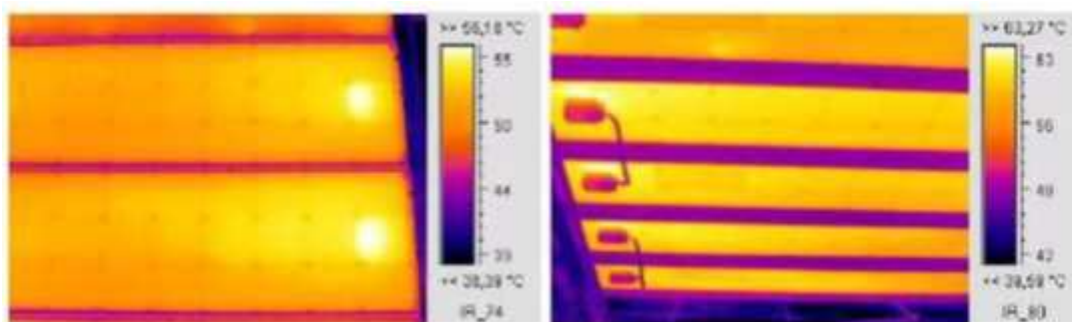
$$R = \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2 \quad (4.5)$$

Poslední z nejdůležitějších parametrů je sériový a paralelní parazitní odpor fotovoltaického článku. Sériový parazitní odpor je odvozen z celkového odporu materiálu polovodiče a odporu kontaktů a propojení. Vysoká hodnota sériového odporu má za následek úbytek napětí na sériovém odporu a v důsledku toho i úbytek napětí na svorkách panelu. Paralelní parazitní odpor může být způsobený rozsáhlými defekty krystalické mřížky, nebo svodovým proudem kolem okrajů článku. Příliš nízká hodnota paralelního odporu deklaruje vadný článek, který se chová jako by byl zevnitř zkratován. [7]

Další parametry, které ovlivňují reálnou účinnost FVE jsou teplotní koeficienty. Teplotní koeficient maximálního výkonu $P_{\max}$ (α) klesá s rostoucí teplotou, přibližně o 0,47 % / °C. Koeficient βI_{SC} (proud na krátko), tento parametr není zrovna přímo závislý na teplotě a s narůstající teplotou I_{SC} nepatrně roste, přibližně o 0,1 % / °C. Teplotní koeficient γU_{OC} (napětí naprázdno), kdy platí, že parametr napětí nakrátko je více závislý na teplotě a hlavně toto napětí více ovlivňuje výkon solárního článku. S rostoucí teplotou klesá zhruba o 0,38 % / °C.

4.5 Defekty a chyby

Pomocí termovizní kamery lze objevit některé defekty fotovoltaických panelů. Mezi časté poruchy patří tzv. efekt připojovací krabice (junction box effect). V těchto případech se na snímku objeví znatelně teplejší místa, ve kterých jsou připojovací krabice (junction box). Tyto místa jsou teplejší o cca. 10 °C. Vypadají podobně, jako na obrázku 4-4, jedná se o snímek z přední strany. U tohoto snímání je podstatné, ze kterého směru se teplota měří, protože ze zadní strany panelu se projeví různé okolní vlivy a konstrukční (ne)dostatky panelu.



Obr. 4-4 Teplotní maximum v místě připojovací krabice [8]

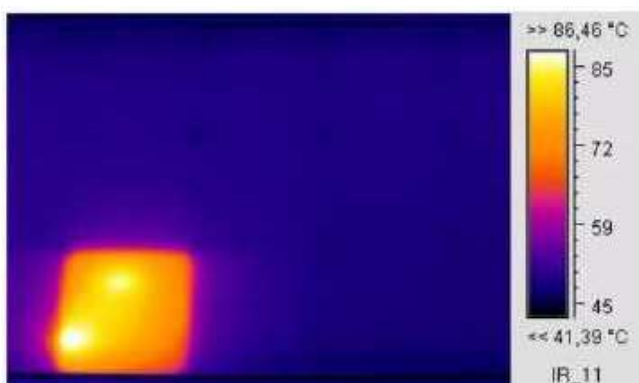
Toto zahřívání je konstantní a proto vede jak k degradaci materiálu, tak k rozdílnému napětí U_{OC} , což vyvolá efekt nesouměrného zatížení a poklesne výkon elektrárny.

Folie EVA, která také degraduje, lépe řečeno tmavne, se také na termovizních snímcích projeví zvýšenou teplotou od okolních článků. Toto opět vede k degradaci výkonu a zrychlenému stárnutí

panelu. Na obrázku 4-5 je vidět fotografie panelů, kde je poškozená EVA fólie, níže na obrázku 4 – 6 je termovizní snímek, ze kterého je patrné výrazné zahřívání v místě, kde degradace EVA vysoká.



Obr. 4-5 Degradace EVA [8]

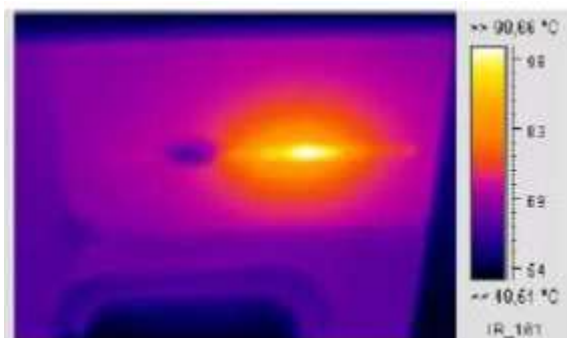


Obr. 4-6 Termovizní snímek degradace EVA [8]

Další významné poruchy snižující výkon fotovoltaického panelu jsou samotné mechanické defekty panelu, jako je třeba koroze na sběrnících. Tento defekt se také projevuje nadměrným zahříváním místa s defektem. Na obrázku 4-7 je vidět zkorodovaná sběrnice panelu, níže na 4-8 je potom snímek z termovizní kamery, který ukazuje nadměrné zahřívání tohoto místa.



Obr. 4-7 koroze na sběrnici [8]



Obr. 4-8 Termovizní snímek zkorodované sběrnice [8]

4.6 Instalace a umístění FVE [12]

Nejvíce elektřiny vyrobí v České republice fotovoltaický panel orientovaný k jihu se sklonem kolem 35°. Přesný sklon ani orientace panelů však nejsou nijak kritické.

Při montáži na střechu domu je proto při současných cenách panelů výhodnější panely umístit paralelně se střešní krytinou (pokud nejsou přímo součástí krytiny). Takové řešení je obvykle nejen ekonomicky výhodnější, ale i lépe vypadá.

Dokonce i při vodorovném umístění je snížení celoročního výnosu elektřiny jen nepatrně nad 10 %. Akceptovatelná odchylka orientace střešní plochy od jihu se při optimálním sklonu pohybuje kolem $\pm 45^\circ$, kdy dochází k poklesu do 5 % celoročního výnosu, případně až $\pm 70^\circ$ při poklesu kolem 10 %.



Obr. 4-9 Výnos energie v závislosti na sklonu a orientaci FV panelu [12]

To však platí pouze v případě, že v okolí se nevyskytují žádné objekty, jako jsou například budovy, kopce nebo stromy, které by mohly na panely vrhat stín.

Například ve velkých fotovoltaických parcích na zemi i na plochých střechách, kde nejen v zimním období, ale i v ranních a odpoledních hodinách v průběhu celého roku, se jednotlivé řady

panelů vzájemně stíní, je optimální sklon nižší. V závislosti na vzdálenosti jednotlivých řad se volí hodnoty kolem 20°. Při samotném určení sklonu panelů je důležité pamatovat na tzv. samočistící efekt panelu. Pokud sklon panelu bude menší než cca. 15° nebude samočistící efekt plně funkční. Z toho plyne, že v případě zaprášení nebo jiných mechanických nečistot, které se během dne usadí na povrchu panelu, budou snižovat účinnost panelu.

Komplikovanější je situace, kdy jsou panely výrazněji stíněny okolními objekty, například v městské zástavbě. V tom případě je optimální sklon a orientaci možno určit například počítačovou simulací, alespoň hrubě odhadnout s využitím výše uvedených poznatků.

Pokud by však výkupní cena elektřiny z fotovoltaických panelů byla v průběhu dne a roku proměnlivá, může být výhodnější jiný sklon a orientace panelů. Tímto způsobem je možno do jisté míry ovlivnit průběh výroby fotovoltaických elektráren.

5 MĚŘENÍ VYBRANÝCH PARAMETRŮ FVE

Na výkon fotovoltaické elektrárny má dopad několik faktorů. Je důležité si uvědomit, že oproti laboratorním podmínkám jsou FVE vystaveny během reálného provozu faktorům, které do jisté míry, v některých případech větších, v jiných menších ovlivňují celkový výkon FVE jako celku.

Vzhledem k tomu, že investor vynaložil na pořízení elektrárny nemalé finanční prostředky, je v jeho nejlepší zájmu, aby se tyto vynaložené prostředky vrátily v co nejkratším čase a po dobu životnosti elektrárny se investice zhodnotila a začala generovat zisk, pokud možno co nejrychleji. Jedná se o tak trochu filosofickou otázku. U malých FVE umístěných na střechách rodinných domů, případně na stodolách je v zájmu vlastníka, aby takovéto elektrárny byly v dobré kondici a dodávaly pro provoz domácnosti, případně do sítě dodat co nejvíce energie. Stejně tak pro střední a velké FVE s tím rozdílem, že je nutné si uvědomit, že na takovýchto výkonech je snížení účinnosti, byť i o jedno procento znatelná finanční ztráta.

Předpokládá se, že diagnostika se již provádí na realizované elektrárně, proto se musí vycházet z podmínek, které jsou na místě samém. Úhel naklonění a umístění elektrárny je ve většině případů neměnný, tedy daný místem instalace, pokud se nejedná o elektrárna s přizpůsobeným natáčením.

Samotná diagnostika FVE je velice důležitá, zejména z ekonomického hlediska provozu elektrárny, to je totiž spřažená s účinností celého celku elektrárny. V České republice je převzata norma pod označením ČSN EN 62446, která přímo pojednává o požadavcích na zkoušení, dokumentaci a údržbu a to jak v případě uvádění elektrárny do provozu, tak i v případě následné údržby a provádění diagnostik na základě, kterých se poté může systém se sníženou účinností optimalizovat.

Cílem práce je stanovit takové parametry fotovoltaické elektrárny, které mají největší vliv na generovaný výkon a pokusit se najít parametry, které mají vliv na zhoršování výkonu elektrárny. Vzhledem k tomu, že se jedná o servisní diagnostiku převážně malých FVE, bude přihlíženo k malé časové náročnosti na provádění měření, dále se musí brát v potaz, že přístup k celému poli FVE nemusí být ideální. Je tedy nutné se pokusit o jakýsi kompromis mezi celkovou diagnostikou a podmínkami in-situ.

5.1 Termovizní diagnostika

V kapitolách výše bylo zmíněno, že povrchová teplota panelů má negativní vliv na výkon FVE elektrárny, proto se jako jedna z možností při diagnostice a posuzování výkonu FVE jeví použití termovizní analýzy. V podstatě jakékoliv měření teploty solárního panelu nám poskytne hodnotné informace o provozu FVE. Avšak termovizní analýza je v tomto ohledu nejvíce efektivní a odhalí nám i jinak skryté poruchy fotovoltaiického panelu. Koneckonců se panely testují termovizní kamerou už v laboratořích a následně „na kvalitě“ zda je schopen vyrobený panel jít do prodeje.

Měřicí přístroje, tedy termovizní kamery jsou dnes na trhu poměrně dobře dostupné a i v nižších cenových rozmezích jsou schopné podat odpovídající výsledky pro diagnostiku panelů.

5.1.1 Vliv teploty a slunečního záření (klimatické vlivy)

Největší vliv na účinnost má teplota a sluneční záření – intenzita a spektrum tohoto záření a z tohoto plynoucí následná degradace samotných panelů. Při běžném provozu na panely dopadá sluneční záření a dochází tedy k jejich zahřívání a ve většině případů jsou podmínky odlišné od těch laboratorních, ve kterých byl panel zkoušen a testován. Samotnou teplotu ovlivňuje teplota okolí, míra intenzity dopadajícího záření, tepelný odpor/vodivost panelu, ale i proudění v okolí (ochlazování povrchu) panelu.

5.1.2 Parametry ovlivněné teplotou panelu

Teplota velice ovlivňuje elektrické vlastnosti, ale i ty mechanické. Nejprve uvedeme ty elektrické. S rostoucí teplotou se U_{OC} znatelně snižuje, pro I_{OC} toto neplatí, naopak se proud na krátko nepatrně zvyšuje. S rostoucí teplotou dochází k poklesu U_{OC} . Jak rychle bude docházet k poklesu napětí (fyzikálním změnám v polovodiči) je do značné míry ovlivněno materiálem a konstrukcí panelu. V případě panelu, který je vyroben z křemíku, je dán pokles 0,004 U_{OC} na Kelvin. Z toho plyne, že při poklesu U_{OC} samozřejmě klesá i U_{mp} a spolu s tím i výkon.

Mechanické pnutí způsobené vyššími teplotami vede k porušování struktury materiálu. To platí jak pro polovodičové součástky v panelu, tak ochranné skla a fólie. Při dlouhodobém působení vysoké teploty dochází i k nevratným změnám ve struktuře materiálu.

Porušování struktury materiálu vlivem teploty [13]

Teplotní namáhání materiálu může být krátkodobé nebo dlouhodobé. V případě krátkodobého namáhání dochází ke změnám vratným, výkon je tedy ovlivněn pouze po dobu působení vyšší teploty a po navrácení k běžným provozním podmínkám se odpovídající vlastnosti materiálu a výkon elektrárny vrací k původním parametrům. I tyto krátkodobé působení však vedou k různým mechanickým namáháním (vznikání zrn v polymeru, změna mechanických vlastností panelu všeobecně) a tím ke snížení životnosti panelu.

V případě dlouhodobého působení teplot dojde ke změnám nevratným a tyto jsou nežádoucí. Dlouhodobé působení vysokých teplot způsobuje nezvratné změny ve struktuře a vlastnostech izolantů. V praxi ve většině případech nedochází ke stálému působení teploty. To bývá většinou rozděleno do dlouhých časových úseků, při nichž dochází k působení teploty na materiál za doprovodu změn. Aby došlo v materiálu k chemickým změnám, musí být splněny dva základní předpoklady:

- molekuly musí mít dostatečnou energii

- velká statistická pravděpodobnost střetu molekul v materiálu

Z hlediska reakční kinetiky lze reakce roztrždit podle různých kritérií. Reakce probíhající v jedné fázi se nazývají homogenní. Reakce probíhající na styku dvou fází jsou nazývány jako heterogenní. Chemické reakce způsobující termooxidační stárnutí jsou reakce homogenní.

První typ tvoří reakce zvrtné, které jsou charakterizovány tím, že současně s danou reakcí probíhá reakce zpětná.

K experimentálnímu vyšetřování životností izolantů se využívá urychleného stárnutí, při němž se z poměrně krátkodobých namáhání odvozují závěry o očekávaných době života při dlouhodobém působení teploty v provozních podmínkách.

Pro posouzení, zda u materiálu vlivem tepelného namáhání došlo k zestárnutí, je nutno zvolit fyzikální veličinu, u které dochází během stárnutí ke změnám. K urychlenému stárnutí se nejčastěji používá ohřátí materiálu na teploty vyšší než je teplota odpovídající jeho provozním podmínkám. Zkouší se nejméně při třech různých vhodně zvolených teplotách. [8]

Vliv dopadajícího záření [8]

Intenzita slunečního záření ovlivňuje mnoho parametrů. Nejvýraznější je změna proudu a napětí jako funkce intenzity dopadajícího záření. Jedná se v podstatě o lineární nárůst proudu v důsledku zvýšení generace párů elektron – díra.

Působením UV-záření dochází k degradaci použitelných materiálů. Zejména ke změně barvy panelu (EVA). To působením kombinace vysoké teploty a UV záření mění svou barvu. Nejprve dochází k jeho žloutnutí a po sléze až k hnědnutí. Ke změně barvy dochází k od středu solárního panelu směrem k jeho okraji.

Změna zabarvení může být způsobena nejen dopadajícím zářením a okolní teplotou, ale i vlivem teploty vzniklé zahříváním článku díky jeho vnitřnímu odporu. Některé buňky vykazují výrazně vyšší stupeň zabarvení. Toto zabarvení způsobuje zastínění článku, čímž dochází k poklesu jeho výkonu.

Degradaci křemíku světlem se projevuje snížením hodnot elektrických parametrů- Pokles výkonu po 24 hodinách osvětlení článku může být až v řádu jednotek procent.



Obr. 5-1 Výnos energie v závislosti na sklonu a orientaci FV panelu [12]

Rozeznáváme dva mechanismy degradace fotovoltaických panelů světlem, aktivní prvkem je v obou případech bór, jímž jsou články nejčastěji dotovány. Degradace se tedy projevuje ve fotovoltaických panelech typu P, v monokrystalickém i polykrystalickém křemíku. Naopak panely typu N dotované fosforem nebo arsenem nevykazují žádnou degradaci dopadajícím světlem ani v případě vyššího obsahu kyslíku v základním materiálu.

- Disociace párů bór-železo při kontaminaci materiálu železem
- Formování rekombinačně aktivních komplexů bór-kyslík v křemíku s vysokým obsahem kyslíku vyrobeném metodou Czochralského

Zjištěny byly dvě hlavní příčiny degradace článků založených na mono i polykrystalickém křemíku dotovaného bórem vedoucí k zřetěžené degradaci doby života nosiče do jejich rekombinace, a to za provozu solárního panelu, tedy při osvětlení.

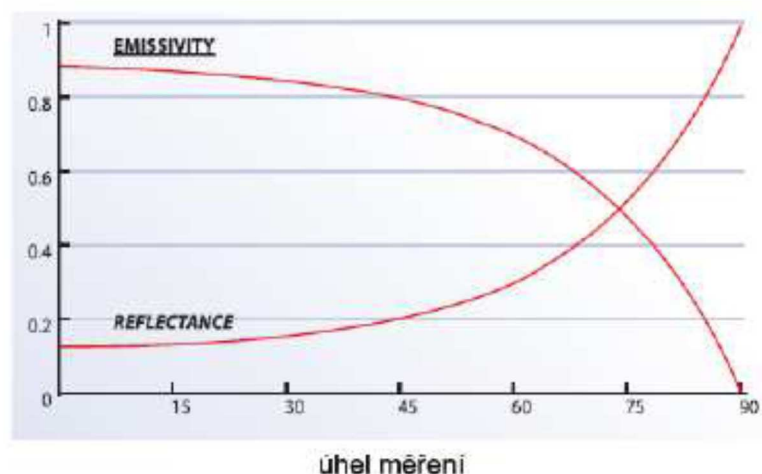
5.1.3 Provádění diagnostiky

Při diagnostice se musí přihlídnout k určitým podmínkám, tak aby nedošlo k mylné interpretaci naměřených hodnot. Je vhodné tedy určit tyto podmínky:

- musí být splněna určitá minimální intenzita záření, podle literatury je minimální hranice intenzity alespoň 500 W.m^{-2} ;
- další důležitý parametr je směr snímání termokamerou a to hned z několika důvodů. Měření kamerou z přední strany je zatíženo chybou, kterou způsobuje nízká emisivita povrchového materiálu panelu, od něj se totiž odráží i teplo z okolních předmětů a značně tak zkresluje výsledné hodnoty. Je proto vhodné stanovit úhel, pod kterým budou panely snímány. Tento úhel by se měl pohybovat v rozmezí $5^\circ - 60^\circ$. Pokud je to možné, je lepší měřit teplotu panelu z druhé strany. Eliminuje se tím rušivý faktor okolních zdrojů. Tento případ je však vyloučen v případě střešních instalací, kde přístup k zadní straně panelu je komplikovaný;
- měření by mělo být prováděno za ideálních podmínek, kdy nejsou okolní teploty vysoké. V ideálním případě, pokud jsou povětrnostní vlivy příznivé, dochází prouděním k přirozenému ochlazování povrchu panelu a snímek z kamery bude zobrazovat přesněji skutečné teploty „uvnitř“ panelu nezatížené teplem z okolních zdrojů a tím i lepší kontrast teplot mezi okolím a snímaným panelem;
- dále je vhodné, aby měření probíhalo při plném provozu (výkonu) elektrárny;

Tyto výše uvedené podmínky jsou však v reálu těžce dosažitelné a proto je vhodné toto při měření zohlednit.

Na obrázku 5-1 je vidět průběh závislost úhlu měření a emisivity a reflexe povrchu panelu. Je zde patrné, proč by se při předním snímání panelu měly úhly pohybovat v rozmezí $5^\circ - 60^\circ$.



Obr. 5-2 Vliv úhlu měření na emisivitu a odrazivost skla [8]

5.2 Analýza podle průběhu A-V charakteristiky

Při samotné diagnostice fotovoltaické elektrárny, je jedním z nejdůležitějších parametrů maximální bod výkonu – $P_{\max}$. Ten vyplývá z v A-V charakteristice panelu. Samotné stanovení $P_{\max}$ je však komplikované, protože charakteristika je dána pro množstvím dopadajícího záření na měřený panel, přičemž je však záření prakticky ve svém spektru prostorově nehomogenní. Charakteristiku také ovlivňuje teplota panelu. Provedením analýzy A-V charakteristiky se zjistí, jakým způsobem pracuje FVE. Je nutné provést toto měření ještě před střídačem, který do jisté míry může měření zkreslit, vzhledem k jeho účinnosti.

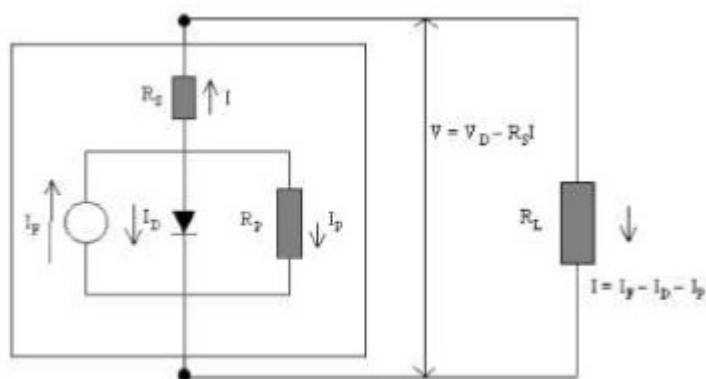
Aby byla diagnostika správná, musí se určit parametry, případně jejich odchylky, které charakterizují poruchy nebo nežádoucí faktory, které ovlivňují funkčnost fotovoltaického panelu. Nejvýznamnější je sériový odpor panelu. Například poruchy struktury panelu významně zvyšují seriový odpor, všeobecně se dá také říci, že jakékoliv nedokonalé pospojení panelů mezi jednotlivými panely, či v připojovací krabici tento parametr zvýší. Další charakteristické vady panelů a jejich dopad na parametry elektrárny jsou uvedeny v tabulce 5-1 .

Tab. 5-1 Projevy různých defektů [8]

Typ defektu	Vliv na A-V charakteristiku
Přerušení propojení článků	Vzrůst R_s
Koroze	Vzrůst R_s , pokles FF (fill faktor)
Snížení propustnosti krycí vrstvy	
- Znečištěním	Pokles FF
- Fyzické nečistoty na povrchu panelu (prach, skvrny, apod.)	Pokles max. výkonu
- Zabarvení EVA	Pokles max. výkonu, pokles FF
Stárnutí polovodičového materiálu	Pokles max. výkonu, pokles FF

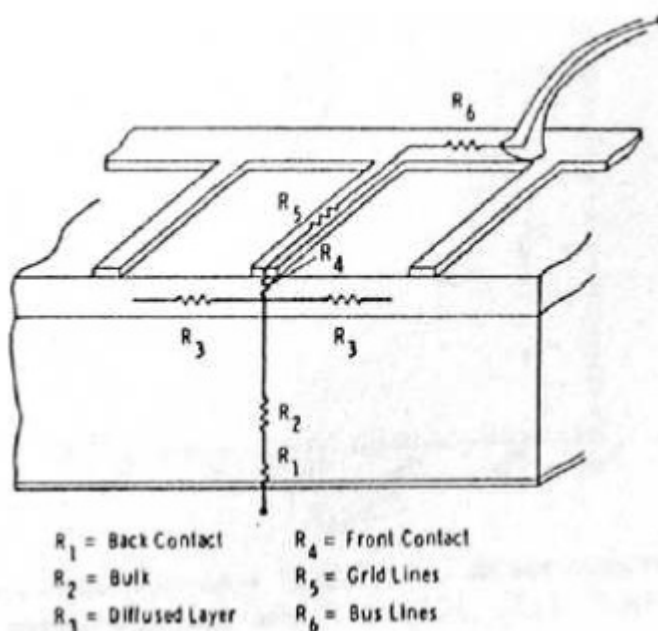
5.2.1 Sériový odpor

Jak bylo uvedeno v předchozích kapitolách, sériový a paralelní odpor významně ovlivňují A - V charakteristiku panelu. V ideálním případě se sériový odpor blíží k nule a paralelní se blíží k nekonečnu. Tyto odpory tvoří z principu nežádoucí úbytky napětí a proudu, tím i ztráty.



Obr. 5-3 Sériový a paralelní odpor [8]

Na obrázku 5-2 je schématicky znázorněn sériový a paralelní odpor. Níže, na obrázku 5-3 je podrobněji popsán sériový odpor, který se skládá z odporů $R_1 - R_6$.



Obr. 5-4 části sériového odporu [8]

6 MĚŘENÍ A DIAGNOSTIKA – TECHNICKÝ POSTUP

Pro kontrolu výkonnosti fotovoltaického systému je vydána norma ČSN EN 61 724 - Směrnice pro měření, výměnu dat a analýzu, zde se popisují přímé a nepřímé veličiny, které je vhodné u FVE měřit. Tyto veličiny pak slouží pro porovnání měření na různých FVE. Dále se zde doporučuje, postup tzv. vzorkování, tedy četnost vyčítání měřených veličin.

Veličiny, které závisí na intenzitě slunečního záření, mají mít kratší interval vyčítání, doporučuje se, aby interval vzorkování nebyl delší než 1 minuta, ostatní hodnoty na intenzitě nezávislé můžou mít interval do 10 minut.

Vzhledem k tomu, že cílem práce je provést servisní diagnostiku, jejíž předpokladem je měření in situ (v terénu) a toto měření je zaměřeno na menší FVE, které jsou v drtivé většině instalované na střechách obytných budov nebo obdobně, kde tyto systémy nejsou vybaveny důkladnějším měřicím systémem, který vyhodnocuje a upozorňuje na stav elektrárny, je nutné stanovit měřené veličiny. Měřicí monitorovací systému se zde neinstalují z prostého důvodu a to, že v tomto případě nejsou totiž investiční náklady na pořízení takového systému finančně návratné s přihlédnutím k pořizovací ceně FVE a následné výrobě elektřiny pro vlastní spotřebu, případně pro dodávku el. energie do distribuční sítě nn.

Proto je vhodné se při vlastním měření zaměřit pouze na nejprokazatelnější faktory ovlivňující výkon FVE a posouzení stavu samotné elektrárny. Výstupem takovéto diagnostiky by mělo být doporučení pro provedení takových opatření, která povedou k větší efektivnosti FVE nebo zhodnocení stavu FVE s informativním charakterem a upozornit další možnosti, které povedou ke zvýšení efektivnosti a nebo budou předcházet zkrácení životnosti FVE.

6.1 Měření pomocí termokamery a vizuální kontrola

Pomocí termokamery budou nasnímány podle možností jednotlivé panely. Měření termokamerou je limitované přístupností místa. U střešních instalací není vždy možné nasnímat jednotlivé panely. Je tedy důležité změřit jich co nejvíce, s rostoucí vzdáleností klesá přesnost měření termokamerou. Dochází i zarušení obrazu odrazem infračerveného spektra zpět, většina přístrojů umožňuje nastavení korekce, ale cca. Od vzdálenost 2 m a větší již nejsou patrné drobné chyby panelu. Pokud by byl panel významněji poškozen, bude to stále na snímku vidět, ale jedná se o ojedinělé případy. Dále je nutné, aby nedošlo k zastínění panelu pracovníkem, který provádí měření i to dokáže ovlivnit měření.

Dále je nutné mít na paměti, že termokamerou se snímá povrchová teplota panelu. Teplota samotných polovodičových součástek bude vždy o několik stupňů větší.

6.2 Měření A-V charakteristiky

Toto měření se provádí přímo na místě, buďto speciálními analyzátory nebo vyčtením potřebných veličin a následné vyhodnocení AV charakteristiky se provede z nasbíraných hodnot. Provádět měření A-V charakteristiky je vhodné provádět u takových panelů, u kterých se prokáže ztráta výkonu. Vzhledem k tomu, že se jedná o malé FVE kde jsou panely v menších počtech umístěné na hůře přístupných místech, je nutné zmínit, že proměřit charakteristiku jednoho panelu znamená dostat se s měřidlem přímo ke kabeláži z jednotlivých panelů. V praxi jsou však panely spojené do tzv. stringů

a odtud je veden DC výkon do střídače. Některé střídače měří dodaný DC výkon, proud a napětí, zde se však jedná o hodnoty ze všech panelů a určení A-V charakteristiky tak postrádá smysl. Za předpokladu, že jsou stringy malé, můžeme proměřit charakteristiku celého stringu, zde se však již můžeme dopouštět chyby ovlivňující měření. Je proto vhodné na místě provést měření pomocí termokamery. Z těchto snímků jsou vidět některé poruchy, které mají za následek snížení výkonu panelu. V případě diagnostiky chyby v panelu je pak vhodné provést proměření analyzátozem či měřidlem samotného panelu, nebo případně stringu.

Dnešní analyzátory umožňují reálné proměření A-V charakteristiky panelu, jsou vybaveny osvitovým čidlem a teploměrem. Díky tomu jsou schopné správně změřit A-V charakteristiku, resp. Zobrazit hodnoty při STC, tedy při standardních podmínkách. Takovéto měření pak poslouží jako podklad pro reklamaci u výrobce spolu se snímkem z termokamery. Analyzátor tedy umí změřit všechny potřebné hodnoty – maximální výkon, napětí naprázdno, napětí a proud při maximálním výkonu a proud nakrátko.

7 SERVISNÍ DIAGNOSTIKA – PRAKTICKÁ MĚŘENÍ

7.1 FVE 1 - České Budějovice 5, J. Čapka

Jedná se o instalaci malé FVE na střeše dvoupodlažního rodinného domu v lokalitě České Budějovice 5. instalace je provedena na sedlové střeše se spádem do 45°. Vzhledem k dispozici domu jsou panely umístěné na obou stranách sedlové střechy. Celkem dva stringy, každý o 10 panelech jsou instalovány na východ a západ. Celkový instalovaný výkon elektrárny činí 4,7 kW_p. FVE je osazena panely Fire Energy FE-235P a střídačem SMA 5000 Tripower. Primárně je FVE zapojena tak, aby pokrývala vlastní spotřebu domu včetně ohřevu TV a vytápění do podlahového topení, přebytek energie je pak dodáván do distribuční soustavy nn přes čtyřkvadrantový elektroměr. Elektrárna je v provozu od 2013.

7.1.1 Popis technických údajů FVE

Tab. 7-1 Technická specifikace panelů a střídače FVE 1, lokalita České Budějovice 5

Fire Energy FE-235P (235W)		
P _{max}	235	[W]
U _{mp}	30	[V]
U _{0C}	36	[V]
I _{mp}	7,83	[A]
I _{sc}	8,77	[A]
Materiál	polykrystalický křemík	
Rozměry	992 x 1 650 x 45	š x v x h [mm]
NOCT	47	[°C]
Záruky uváděné výrobcem		

80 % výstupního výkonu	25	[rok]
90 % výstupního výkonu	10	[rok]

Střídač SMA 5000 Sunny tripower		
Maximální vstupní napětí	1 000	[V]
Napěťový rozsah MPP	245 – 800	[V]
Jmenovitý výkon	5 000	[Wp]
Maximální vstupní výkon ($\cos\varphi=1$)	5 100	[W]
Maximální účinnost ³	97,1	[%]
Síťové napětí	230/400	[V]
Síťové frekvence	(50, 60) $\pm$ 5	[Hz]
Nominální AC napětí	3 / N / PE; 230 / 400	[V]

7.1.2 Technické zhodnocení umístění a zapojení FVE

Vzhledem k dispozičnímu umístění budovy nemohly být panely situovány jinak než na západní a východní stranu. Z tohoto důvodu nevyužívá elektrárna svůj maximální potenciál, ideální umístění na jih, potažmo na jihovýchod vede ke ztrátám výnosu okolo cca. 5 %. V tomto případě jsou stringy rozloženy na východ a západ, v případě takového umístění jsou ztráty z výnosu okolo 15 %. Vzhledem k tomu, že je však každý ze stringů umístěn na každou stranu; západní i východní strana má výkon 2 350 kW_p, pak je za dobrého slunečního počasí zajištěná rovnoměrná výroba elektrické energie po celý den. Platí pravidlo, že největší množství energie vyrobí v České republice fotovoltaický panel orientovaný k jihu se sklonem kolem 35°, v podmínkách České republiky a v případě instalace menších výkonů nehraje přesný sklon ani orientace panelů úplně zásadní roli, je však nutné se od této poučky nijak výrazně odchýlovat.

Panely jsou instalovány na sedlové střeše se sklonem 40°, což je vhodné pro dosažení optimálního využití dopadajícího záření. Pro fotovoltaické panely je nejvhodnější sklon 35°, zde se však počítá s tím, že nejvíce bude výroba el. energie probíhat v letních měsících. Pro celoroční provoz je naopak nejideálnější sklon 45°, zde je však nutné brát v potaz, že takového sklonu se více používá u solárních kolektorů, které ohřívají vodu pro další využití.

Protože je rodinný dům dvoupodlažní a v dané lokalitě nejsou žádné vzrostlé stromy či zástavba, která by bránila dopadání přímého slunečního svitu, jsou panely ideálně umístěny.

³ Podle evropské normy



Obr. 7-1 pohled na FVE ze západní strany

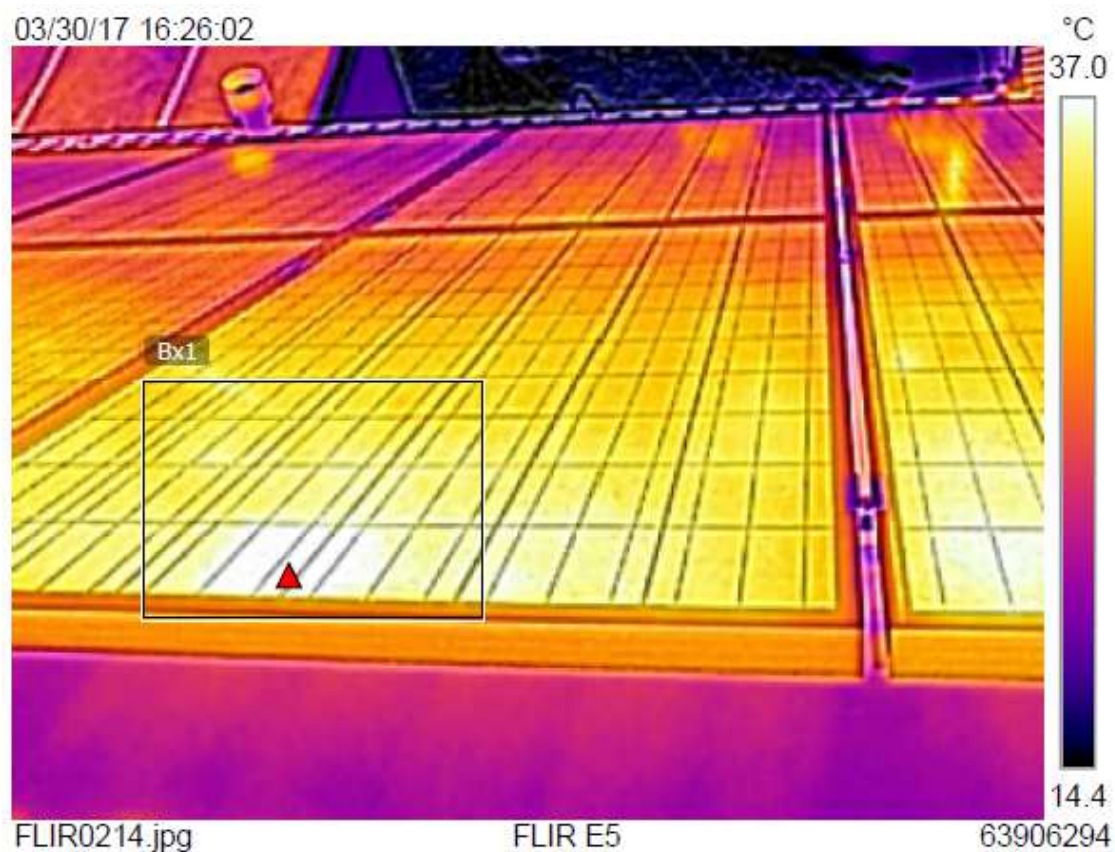
7.1.3 Termovizní analýza

Termovizní analýza byla prováděna za jasného počasí, denní průměr dopadajícího slunečního záření činil 600 - 750 W/m². Teplota okolí v místě měření byla 20 °C. Termokamerou byly snímány pouze panely umístěné na západní straně z vikýřového okna. Panely umístěné na východní straně nebyly již natolik osvětleny, aby provedené měření mělo přínos. Jako měřicí přístroj byla použita termovizní kamera FLIR E5.

Na obr. 7-2 jsou vidět nejteplejší místa na panelu. Nejteplejší místo, která je reprezentováno nejsvětlejším místem na snímku je 38 °C. Podle datasheetu pro použité panely odpovídá NOCT 47 °C. Při provádění měření tedy nedocházelo k přehřívání panelu, dá se však předpokládat, že v letních měsících při plném osvětlení panelu, budou panely zahřívány mnohem více a můžou se přehřívat v exponovaných místech. Konkrétní místo na snímku představuje napojení stringu na sběrný kabel. V tomto místě se předpokládá největší teplota. Naopak nejchladnější místa na snímku svědčí o tom, že kolem panelu, a zejména pod ním proudí vzduch a dochází k přirozenému ochlazování panelu, tím se zvyšuje účinnost, protože nedochází k přehřívání panelu.

FVE je v provozu od roku 2013, v některých místech je na panelech viditelná začínající degradace EVA folie, zejména na obr. 7-4 a 7-6. Přesto není na termovizních snímcích zcela patrné zahřívání exponovaných míst. Na obr. 7-5 je již patrnější, že dochází k zahřívání, teplota v měřeném místě dosahuje 39,1 °C.

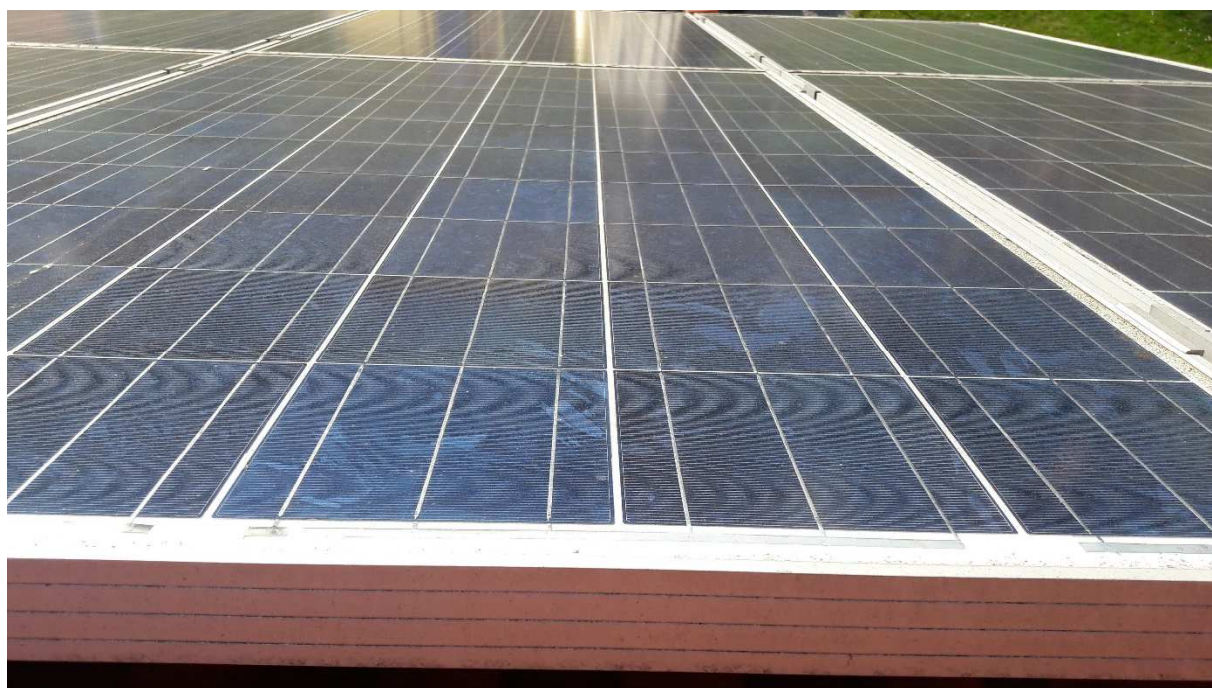
Panely jsou instalovány pod úhlem 40° což dobře ovlivňuje samočistící schopnost panelu. Na obrázcích 7-5 a 7-6 je dobře vidět, co nastává, pokud je panel znečištěný. Ačkoliv se jedná o drobné znečištění ptačím trusem, jsou vidět na obrázku tmavá místa, kdy nedochází o světlení znečištěné části, v případě velkého znečištění, například zaprášení pylem nebo prachem, například ze silniční dopravy by došlo ke snížení výkonu panelu až o 50 %.



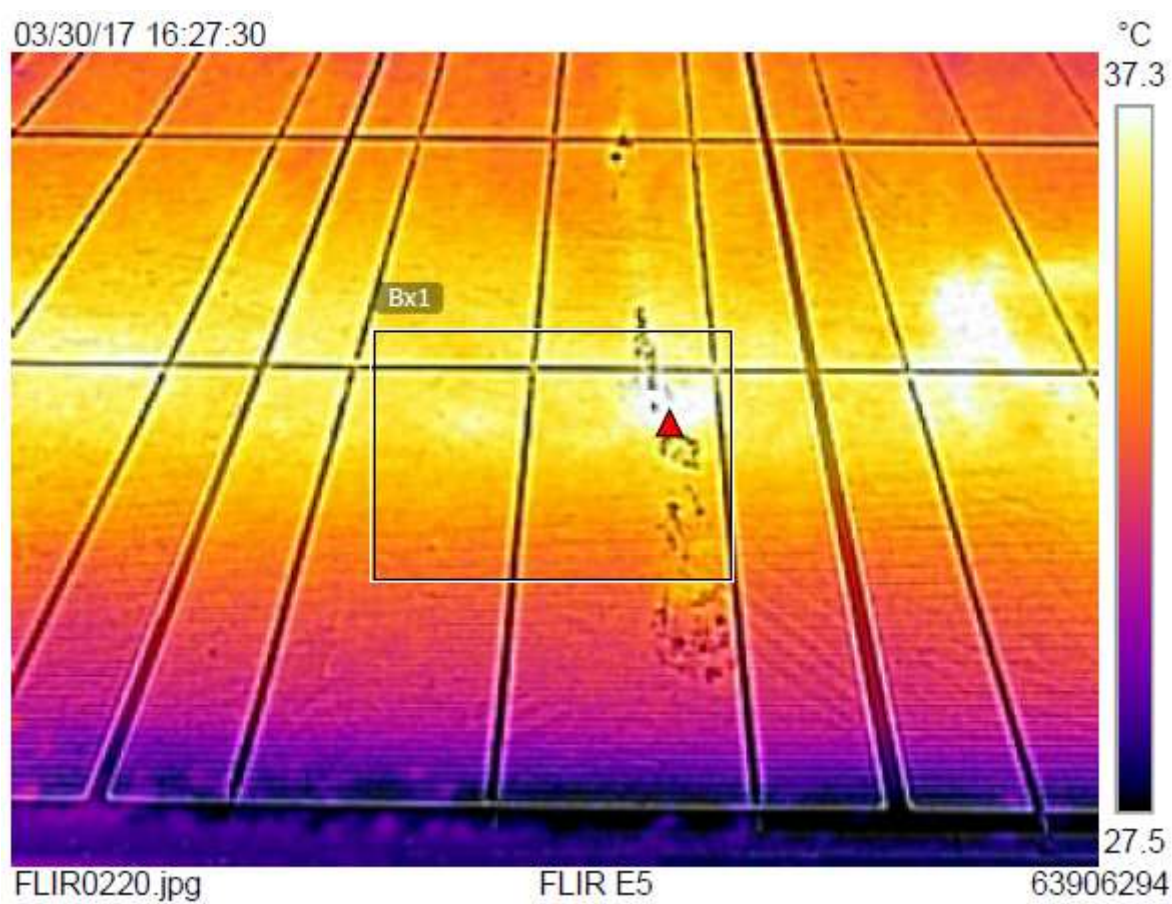
Obr. 7-2 snímek 1 (termovize), západní strana – $t_{\max} = 38\text{ °C}$



Obr. 7-3 snímek 1, západní strana



Obr. 7-4 snímek 1, západní strana, začínající degradace EVA folie

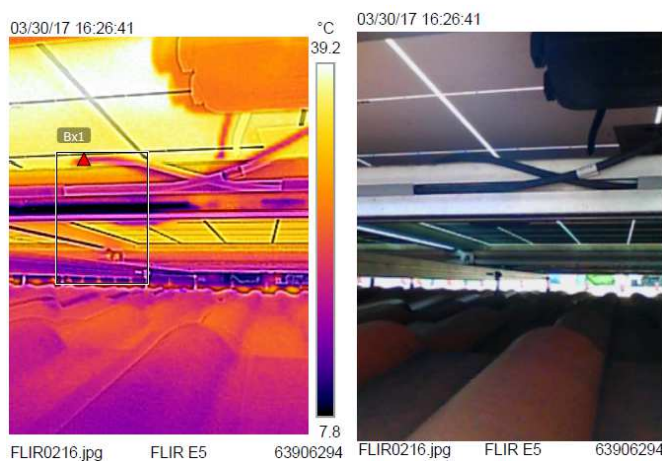


Obr. 7-5 snímek 2, západní strana, začínající degradace EVA folie, $t_{\max} = 39,1\text{ }^{\circ}\text{C}$

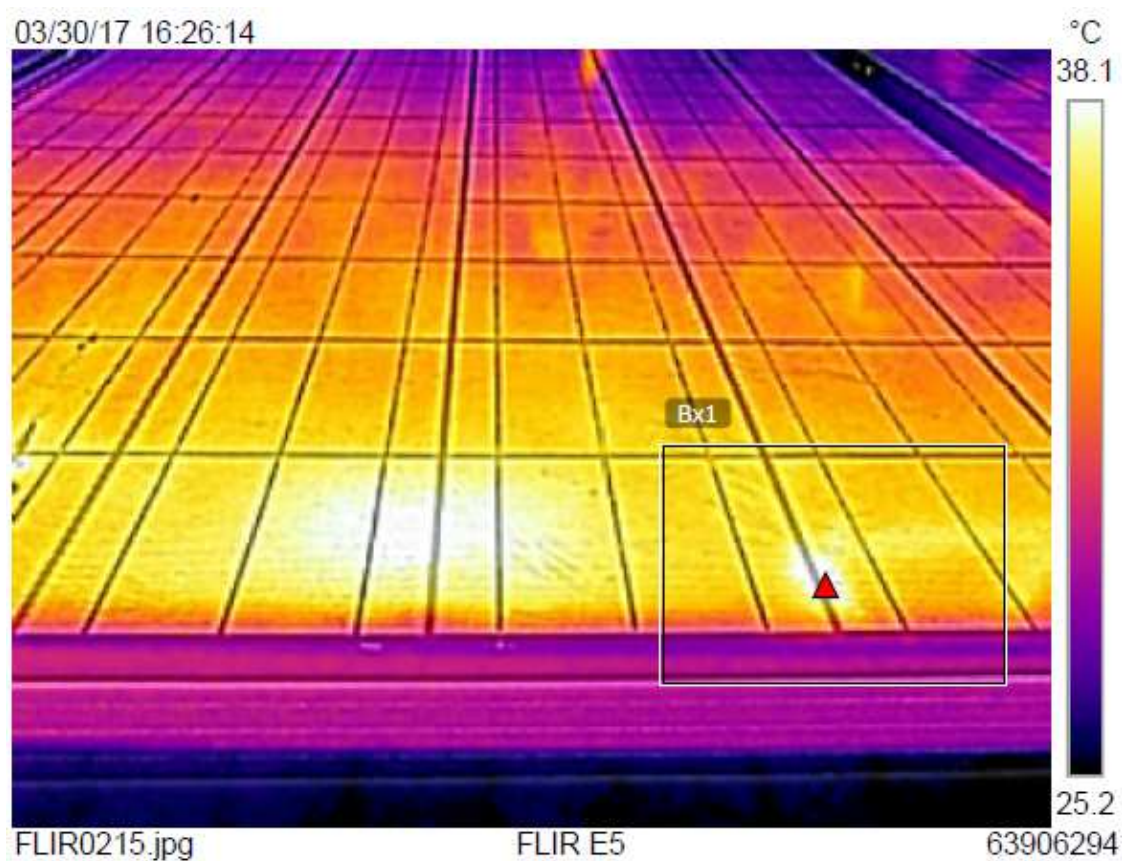


Obr. 7-6 snímek 2, západní strana, začínající degradace EVA folie

Na obrázku 7-7 je pomocí termokamery nasnímána spodní část panelu. Zde je vidět, že dochází k přirozenému chlazení panelu. Dále je vidět kabeláž, kde je patrné, že neodchází k přehřívání. Junction-box má teplotu cca. 30 °C, ačkoliv zde dochází ke spojení více panelů dohromady, zvýšená teplota odpovídá ohřívání od spodní části panelu. Na obrázcích 7-8 a 7-9 vykazuje termosnímek zvýšenou teplotu v bodě sběrnice panelu. Zde se jedná patrně o začínající korozi sběrnice. Vypracované protokoly ze snímání termokamerou jsou uvedeny v příloze 1.



Obr. 7-7 snímek 3, západní strana, spodní část panelu



Obr. 7-8 snímek 4, západní strana, lehce korodující sběrnice



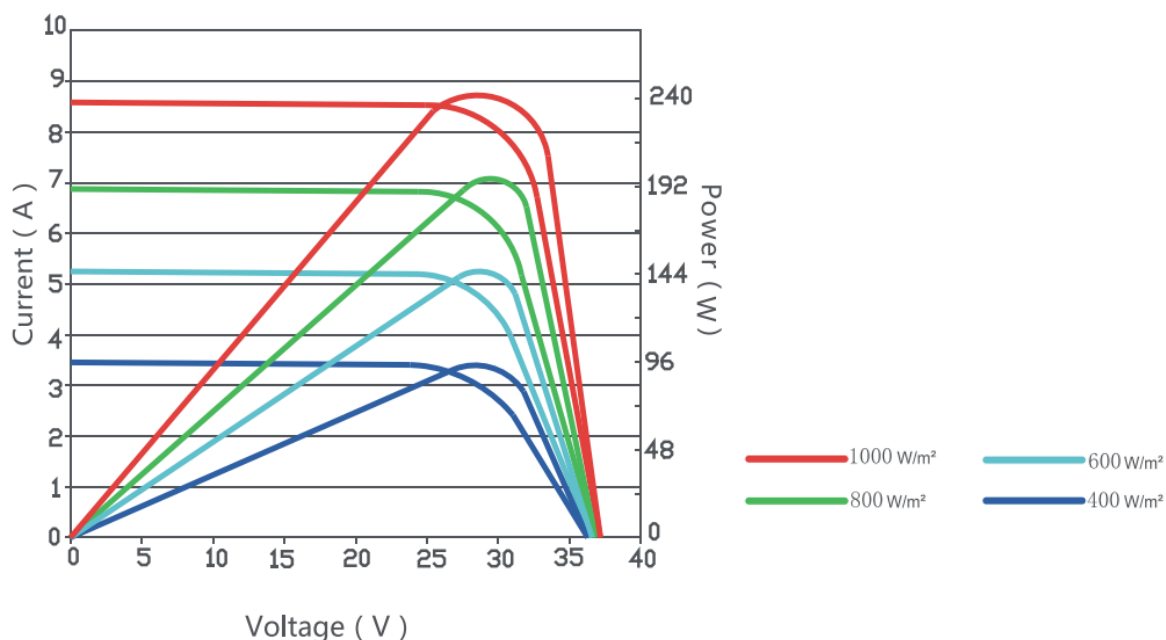
Obr. 7-9 snímek 4, západní strana, lehce korodující sběrnice

7.1.4 Výkonové měření

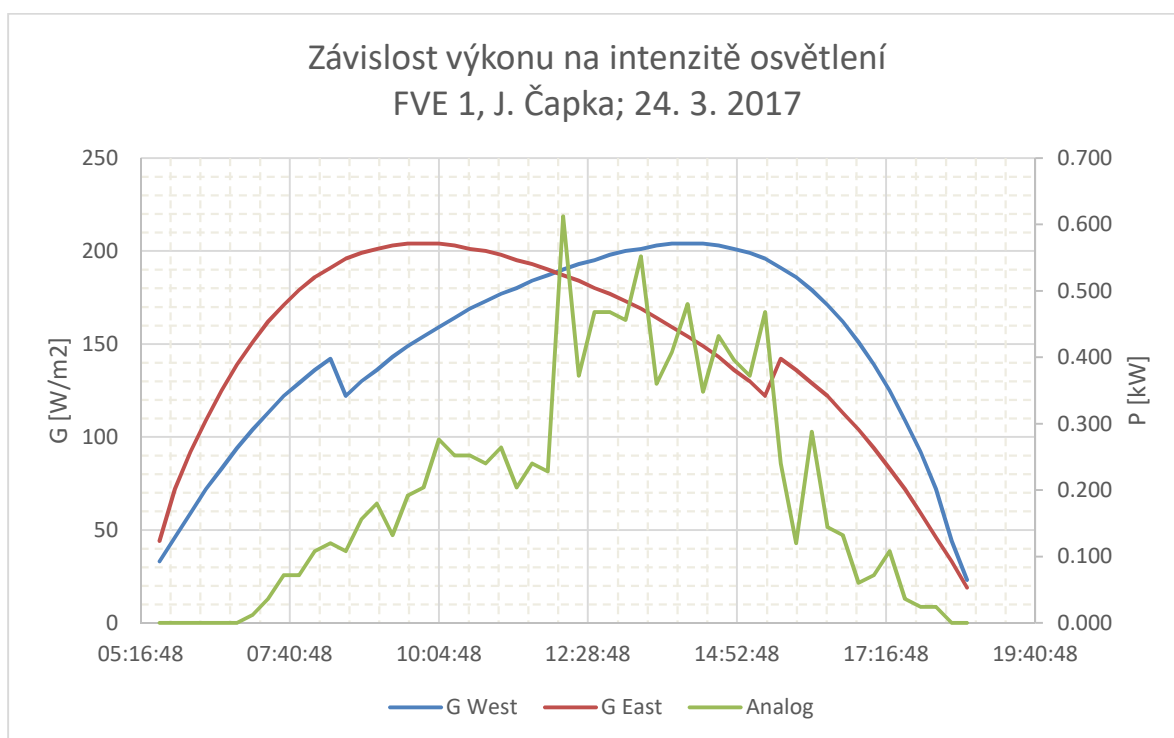
Cílem výkonového měření je vyhodnotit dodávaný výkon FVE. Vychází se ze získaných dat na místě, použitý inverter SMA 5000 vyhodnocuje a zaznamenává aktuální dodávaný AC výkon ze střídače a celkové množství vyrobené energie. Pro vyhodnocení a posouzení provozu FVE byly použity exportované záznamy z databáze o aktuálním vyráběném výkonu. Tyto data byla porovnávána s údaji z databáze PVGIS, tento nástroj je volně dostupný na internetu (<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>). Zde jsou k dispozici data o slunečním záření dopadající na Evropu, dále jsou zde zohledněny podmínky, jako je převýšení v daném místě, natočení a sklon panelů. PVGIS potom z výpočtových modelů a dlouhodobých měření vyhodnotí průběh denního záření. Ačkoliv se jedná o teoretický model a hodnoty jsou průměrné, poskytují určitý přehled o dopadajícím záření na FVE. Data z tohoto systému se používají například pro modelové výpočty návrhu fotovoltaických systémů, například pomocí programu RETScreen Expert nebo System Advisor Model. Ačkoliv se tedy použitím těchto dat měřící osoba dopouští určité nepřesnosti a velkého zjednodušení, tak se tímto postupem dá plně nahradit zdlouhavé a drahé měření intenzity dopadajícího záření.

Vzhledem k tomu, že je FVE rozdělena na dva stringy, z nichž jeden situovaný na východní a druhý na západní stranu, jsou v grafech vždy znázorněny dvě křivky pro dopadajícího záření, každý pro úhel a azimut stringu. Tato metoda se ukázala, jako velice efektivní co se týče výkonového hodnocení FVE, protože i z empiricky stanovených hodnot dopadajícího záření je prokazatelně znázorněn průběh výroby FVE.

Níže jsou uvedeny modelové příklady měření z různých dní na konci měsíce března 2017. Samostatné grafy jsou v příloze 2 této práce.

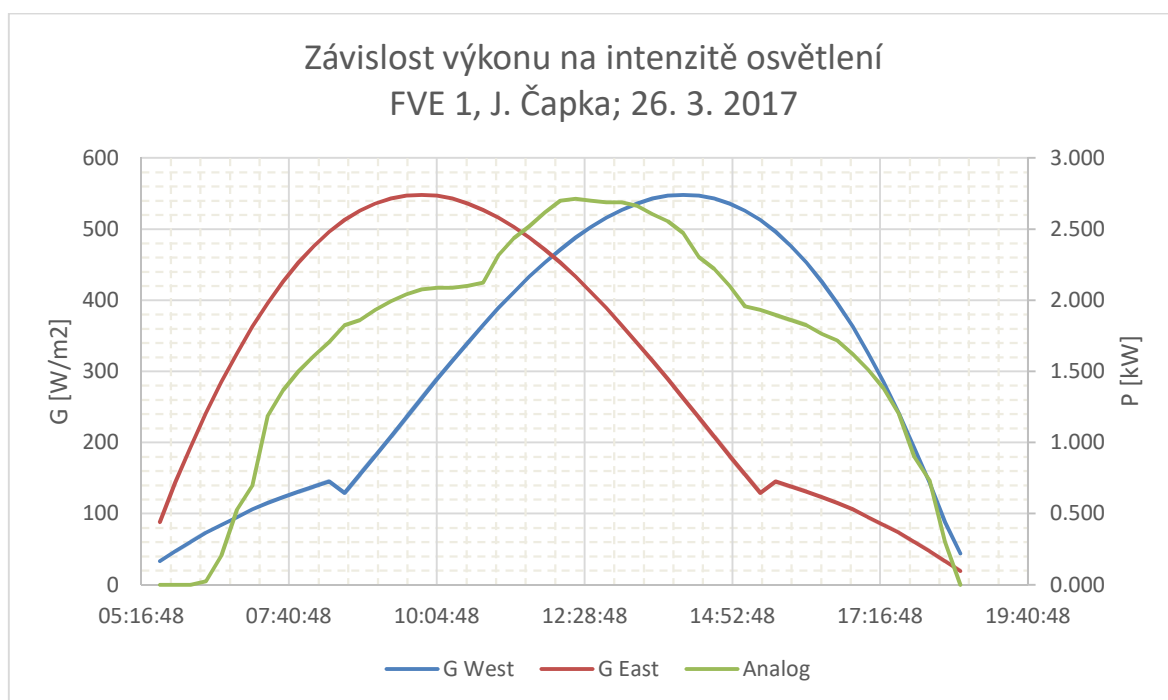


Obr. 7-10 A-V charakteristika jednoho panelu Fire Energy 235P



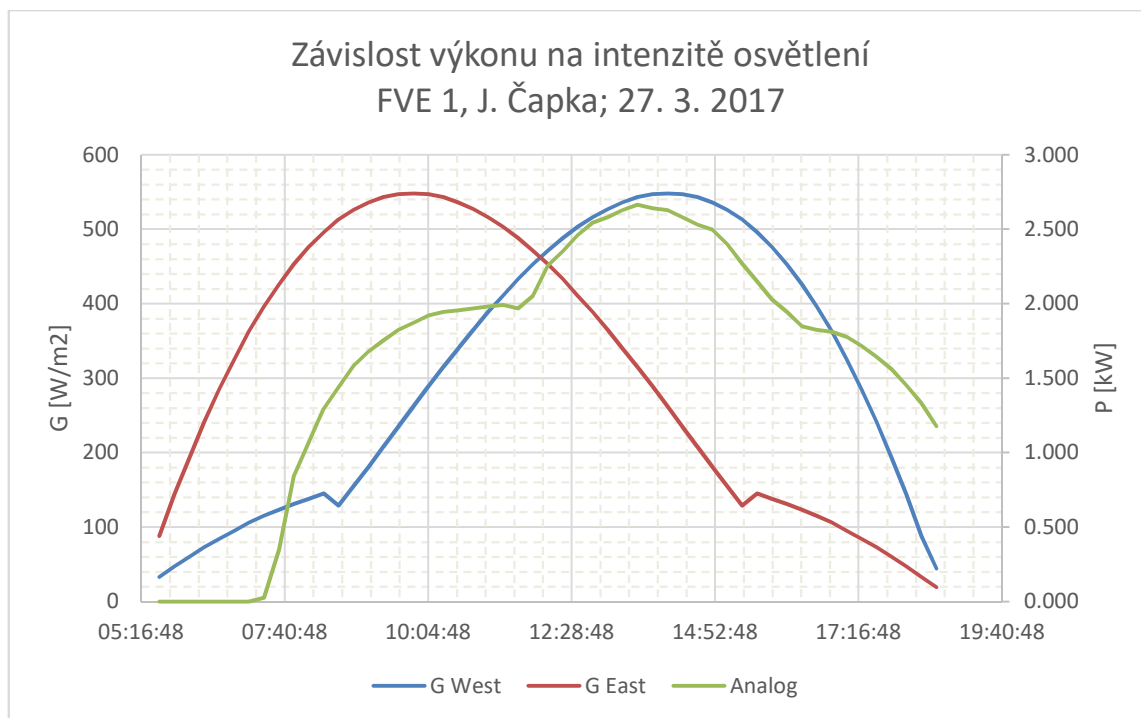
Graf 7-1 Závislost výkon na intenzitě osvětlení z 24. 3. 2017

Graf 7-1 znázorňuje průběh dodávaného výkonu při špatném počasí, vysoká oblačnost, teplota v rozmezí 10 – 13 °C. Zde je vidět, že i při zvýšené oblačnosti je FVE schopná dodávat minimální výkon. Z grafu je patrné, že cca. Od 12:00 došlo k lehkému zvýšení dopadajícího záření a můžeme tvrdit, že oba stringy dodávaly výkon rovnoměrně i když s menší účinností vzhledem k jejich orientaci na západ a východ. Dopadající záření má také nižší hodnoty vzhledem ke zvýšené oblačnosti.



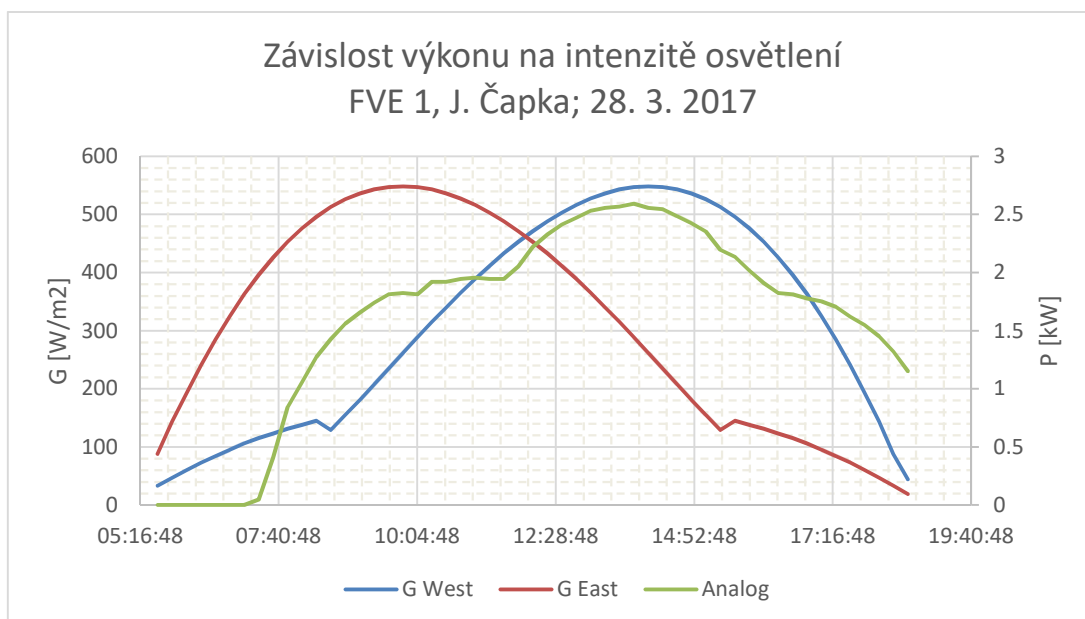
Graf 7-2 Závislost výkon na intenzitě osvětlení z 26. 3. 2017

Oproti tomu, dne 26. 3. 2017 nebyla skoro žádná oblačnost a tato skutečnost je vidět i z průběhu výkonu FVE. Hned při osvětlení východní strany začala FVE dodávat výkon odpovídající dopadajícímu záření. Zhruba od 11:30 začaly být osvětlovány oba stringy rovnoměrně a dodávaly s přihlédnutím k ročnímu období v podstatě maximální výkon. Celkový instalovaný výkon FVE činí 4 700 kW_p, maximální dodávaný výkon ve 13:35 činil 2 664 kW. Dále je klesající výkon spolu s přechodem Slunce na západní stranu.

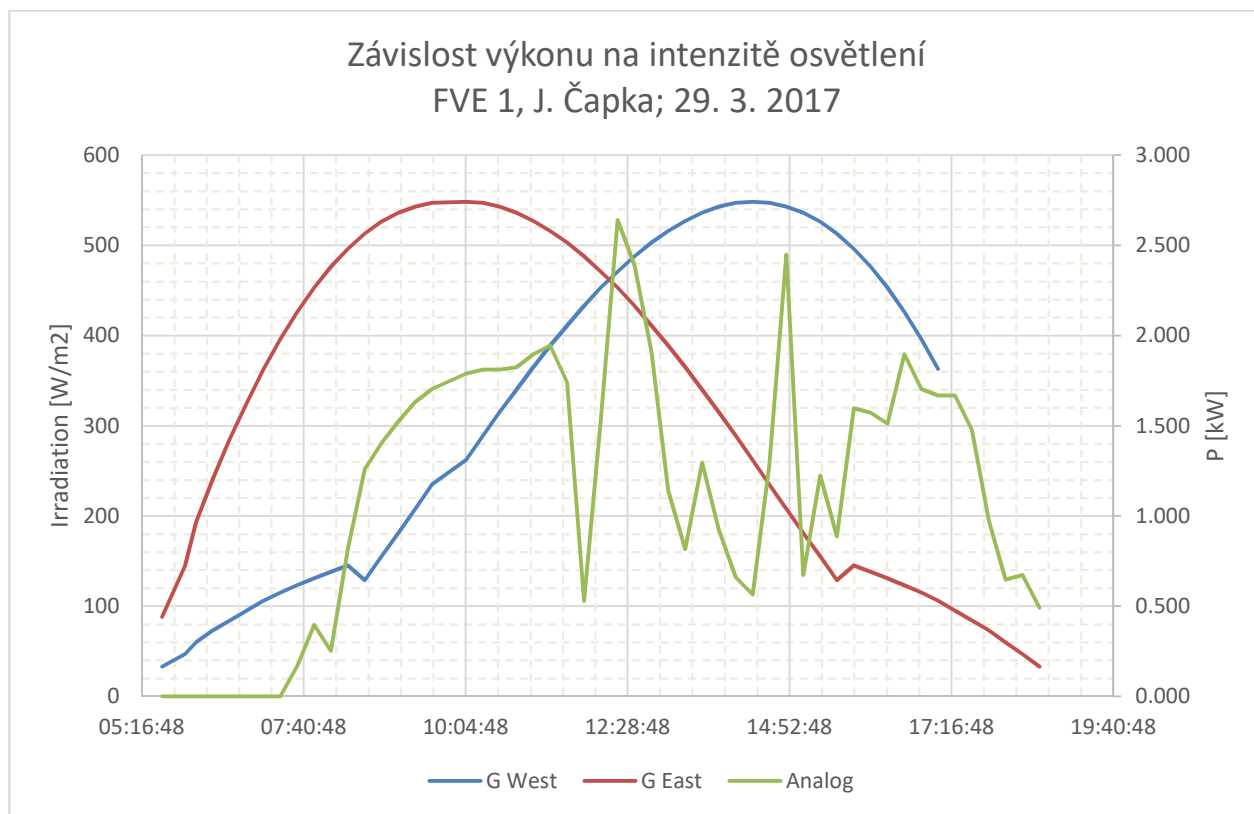


Graf 7-3 Závislost výkon na intenzitě osvětlení z 27. 3. 2017

Obdobně jako předešlý den je v grafu 7-3 pozorovatelná vysoká dodávka elektrické energie. Vzhledem k použitému vzorkování 20 min se můžou v grafech vyskytovat nepřesnosti, to však ke stanovení parametrů, které mají vliv na výkon, není tolik směrodatné. Obdobně je výkonový průběh patrný z grafu 7-4.

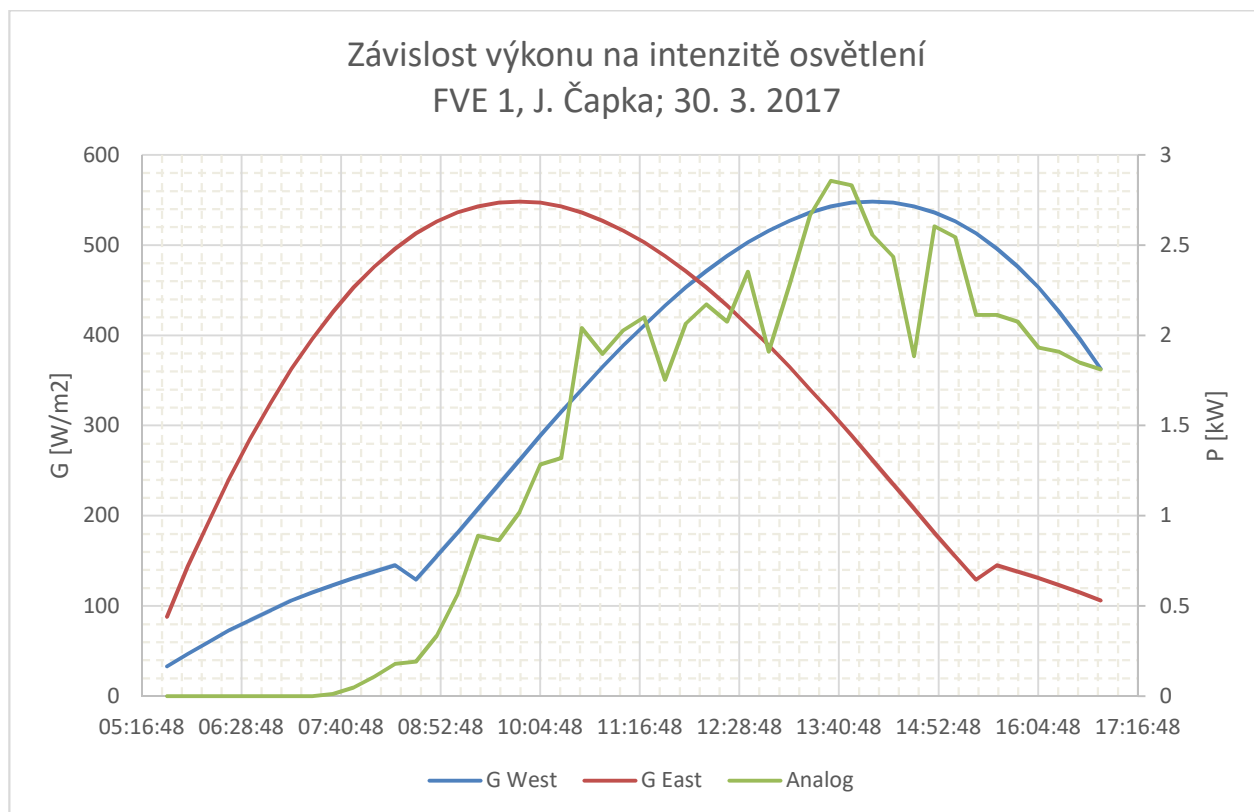


Graf 7-4 Závislost výkon na intenzitě osvětlení z 28. 3. 2017



Graf 7-5 Závislost výkon na intenzitě osvětlení z 29. 3. 2017

V grafech 7-5 a 7-6 je již pozorovatelná zvýšená oblačnost, kdy při zastínění panelu mraky dochází k razantnímu snížení výkonu, při vyjasnění opět dochází k velice patrnému navýšení výkonu.



Graf 7-6 Závislost výkon na intenzitě osvětlení z 30. 3. 2017

Na obr. 7-10 je znázorněna A-V charakteristika použitého panelu Fire Energy 235P. V této charakteristice je promítnut výkonový průběh jednoho panelu. Z naměřených výkonů pouze ze záznamu použitého ze střídače a průběhu denní intenzity slunečního záření se dá konstatovat, že elektrárna pracuje ve výkonové hladině udávané výrobcem.

Z grafů 7-5 a 7-6 je také patrný obrovský nedostatek výroby elektřiny z OZE, analogicky platí to samé například i pro větrné elektrárny. V případě malých zdrojů si s kolísáním výkonu elektrizační soustava do jisté míry poradí, výkon se vyreguluje samotnou setrvačností sítě, může minimálně (v rámci norem pro kvalitu elektrické energie) dojít k poklesu frekvence v síti nebo napětí v síti.

U velkých zdrojů je toto však problém, se kterým se dnešní elektrizační soustavy zatím neumí mnoho poradit. Usilovně se pracuje na různých řešeních, jak této kolísavé dodávce výkonu čelit například bateriovými uložišti nebo prostě zálohou ve formě konvenčních elektráren. Potom dochází k extrémním případům, kdy elektřina podle fyzikálních zákonů teče do místa s nižším potenciálem, to však nemusí zvládnout dimenze přetokové trasy a potom dochází k black outům.

Dalším nešvarem kolísavé dodávky elektrické energie je stav, kdy OZE dodávají výkon do sítě, ten je u koncových spotřebitelů zužitkován, ale při zatažení oblohy náraz přestane FVE dodávat výkon do sítě a tento chybějící výkon musí být někde vyroben a dodán, aby nedošlo ke kolísání frekvence sítě – veškerý instalovaný výkon musí být někde zálohován ať už formou konvenčních elektráren spalujících fosilní paliva nebo je prostě nakoupen od zahraničních sousedů.

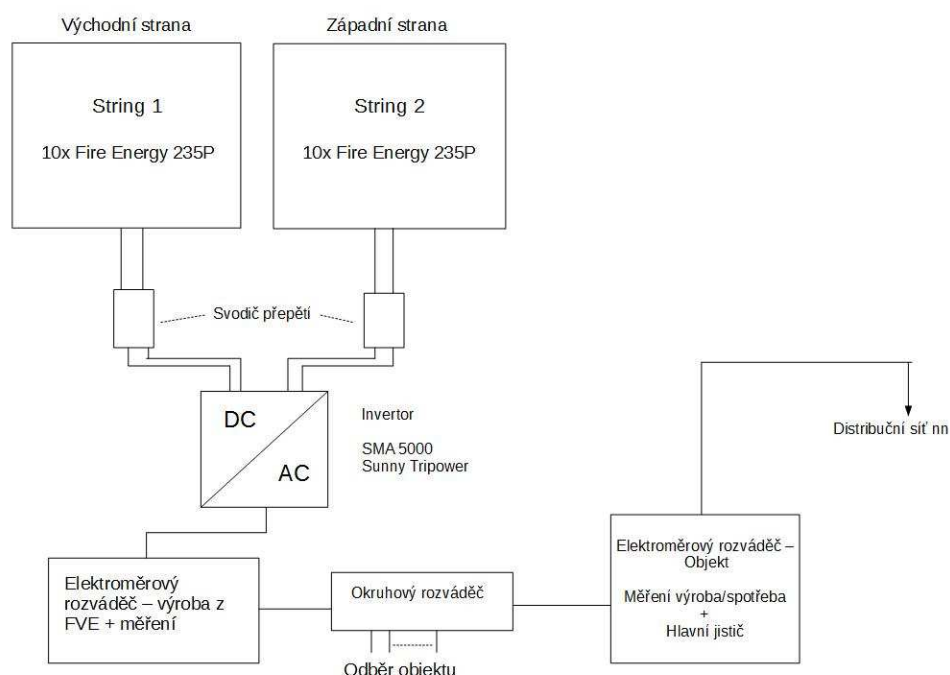
7.1.5 Elektrické zapojení FVE

Na obr. 7-11 je zjednodušené blokové schéma zapojení FVE. Oba stringy jsou zapojeny přes svodiče přepětí do invertoru SMA 5000 Sunny Tripower kde se vyrobený DC výkon v panelech mění na AC o parametrech sítě, tedy na 230/400 V a 50 Hz. Jedná se o třífázový inverter. Odtud je dále již elektřina o síťových parametrech vedena do elektroměrového rozváděče kde se na samostatných fakturačních hodinách měří vyrobený výkon, ten měří i samotný střídač, ten však nemůže sloužit jako fakturační měřidlo. Dále přes okružový rozváděč odkud jsou vývody pro vlastní spotřebu v objektu. Vlastník FVE zvolil ne úplně klasický přístup pro využití vyrobené elektrické z FVE. Součástí FVE je tedy použit regulátor s plynulou regulací GreenBonO, který inteligentně využívá vyrobené přebytky z FVE.

FVE je zapojena do tzv. Zeleném bonusu, viz kapitola 3.2.2. výroba elektřiny slouží zejména pro vlastní spotřebu a přebytky jsou prodávány do sítě. Zde se musí brát v potaz, že vlastníkem využívá regulátor GreenBono, který maximalizuje využití výroby elektřiny pro vlastní spotřebu.

Toto praktické řešení bere v potaz situaci, kdy FVE vyrábí určitý výkon, který je však větší než je současná vlastní spotřeba objektu. V tomto případě může docházet a v praxi také dochází k tomu, že veškerý přebytný výkon je dodáván do sítě, ale výkupní cena elektřiny není nikterak zajímavá. K tomuto stavu dochází většinou v letních měsících, zejména když je objekt prázdný a elektřinu spotřebovává pouze elektronika Tento regulátor je vlastně takový první krůček ke smardgridu, resp. zapojení domácnosti se chová jako malý ostrovní smardgrid.

Zvolené řešení vlastníka spočívá v tom, že je možné kdykoli spotřebovávat veškerý přebytný výkon z FVE, který by jinak „odtekl“ do sítě. Proto regulátor plynule přizpůsobuje okamžitý příkon zvolených spotřebičů, tak aby odpovídal přebytnému výkonu. Toho je dosaženo řízením výkonové tyristorové součástky – polovodičového relé SSR (Solid State Relay). PI regulátor řídí hustotu spínání jednotlivých period pomocí SSR relé a tím zajišťuje řízení příkonu spotřebičů napojených na výstup SSR v rozsahu 0 – 100 % využití výkonu.



Obr. 7-11 Blokové schéma zapojení FVE 1

Toto řešení má i své nevýhody. Vzhledem k tomu, že je pulzně spínán přebytečný výkon, dochází ke změně průběhu proudu a napětí, některé půlperiody jsou spínáním vyrušeny. Z tohoto důvodu se tento způsob regulace může využít pouze u odporových zátěží, tedy pro ohřev TV apod., pokud by byl připojen například motor (je jedno jestli 3f nebo 1f, případně spínaný zdroj) došlo by jejich poškození. Vlastník proto nepoužívá vyrobený výkon pro celý objekt, ale pouze pro dodávku do distribuční sítě a pomocí regulátoru si ohřívá TV, podlahové topení nebo přehřívá na kotli. Obdobně se tohoto řešení dá využít například pro ohřev vody v bazéně. S využitím dalších úprav je možné i tento přebytečný výkon využívat pro klimatizaci.

Po elektrické stránce je zapojení FVE efektivní a zcela využívá potenciál výroby elektrické energie. Drobná výhrada je pouze k umístění svodičů přepětí, ty by měly být podle normy instalovány co nejbližee samotným stringům. Zde je však svodič přepětí instalován až před střídačem, v případě úderu blesku může dojít k poškození DC části vedení včetně panelů samotný měnič je, ale ochráněn. Riziko větší přepětí, které se naindukuje na DC vedení je však eliminováno instalací bleskosvodu, v případě úderu blesku však může dojít ke zbytkové indukci do DC vedení, nainstalované svodiče však ochrání střídač a navazující částí.

7.2 FVE 2 - Borovany

Jedná se o instalaci malé FVE na sedlové střeše zahradního domku v lokalitě Borovany. Spád střechy je 45°. Orientace panelů je na jih. Instalace FVE se skládá z jednoho stringu v počtu 18 ks panelů. Celkový instalovaný výkon elektrárny je 4,05 kW_p. FVE je vybavena panely výrobce Sun Power-225P a střídačem Fronius IG 50 PLUS. Primárně je FVE zapojena tak, aby pokrývala vlastní spotřebu přilehlého rodinného domu, přebytek energie je pak dodáván do distribuční soustavy nn přes čtyřkvadrantový elektroměr. Elektrárna byla uvedena do provozu v roce 2009. V tehdejší době

byl boom budování solárních elektráren na svém vrcholu, stop stav připojování elektráren do sítě byl vyhlášen až v roce 2010. Vzhledem k tomu, že se jedná o malou elektrárnu s výkonem do 10 kW_p, nejsou pro připojení k síti žádné zvláštní požadavky, postačí přeložení distributorovy sítě dokumentací ke schválení a mít uzavřenou smlouvu s provozovatelem elektrizační soustavy.



Obr. 7-12 Umístění FVE 2, jižní strana

7.2.1 Popis technických údajů FVE

Tab. 7-2 – Technická specifikace panelů a střídače FVE 2, lokalita Borovany

Sun Power SPR-225 WHT		
P _{max}	225	[W]
U _{mp}	41	[V]
U _{0C}	48,5	[V]
I _{mp}	5,49	[A]
I _{sc}	5,87	[A]
Materiál	polykrystalický křemík	
Rozměry	798 x 1 559 x 46	š x v x h [mm]
NOCT	46	[°C]
Záruky uváděné výrobcem		
80 % výstupního výkonu	25	[rok]
90 % výstupního výkonu	10	[rok]

Střídač Fronius IG 50 PLUS		
Maximální vstupní napětí	600	[V]
Napěťový rozsah MPP	230 – 500	[V]
Jmenovitý výkon	4 000	[Wp]
Maximální vstupní výkon ($\cos\varphi=1$)	4 260	[W]
Maximální účinnost ⁴	95	[%]
Síťové napětí	230	[V]
Síťové frekvence	(50, 60) $\pm$ 5	[Hz]
Nominální AC napětí	1 / N / PE; 230	[V]

7.2.2 Technické zhodnocení umístění a zapojení FVE

FVE je umístěna směrem na jih, což je v podmínkách České republiky odpovídá nejlepšímu možnému řešení, střecha je se sklonem 45°. Ideální sklon střechy, potažmo panelů je 35° pro maximální využití dopadající sluneční energie v letních měsících. Maximální instalovaný výkon FVE činí 4,050 kW_p. Vzhledem k dispozičnímu umístění panelů může při plném osvětlení dodávat elektrárna skoro maximální výkon. V blízkém okolí se nenachází žádné vzrostlé stromy nebo objekty, které by vrhaly stín na elektrárnu.

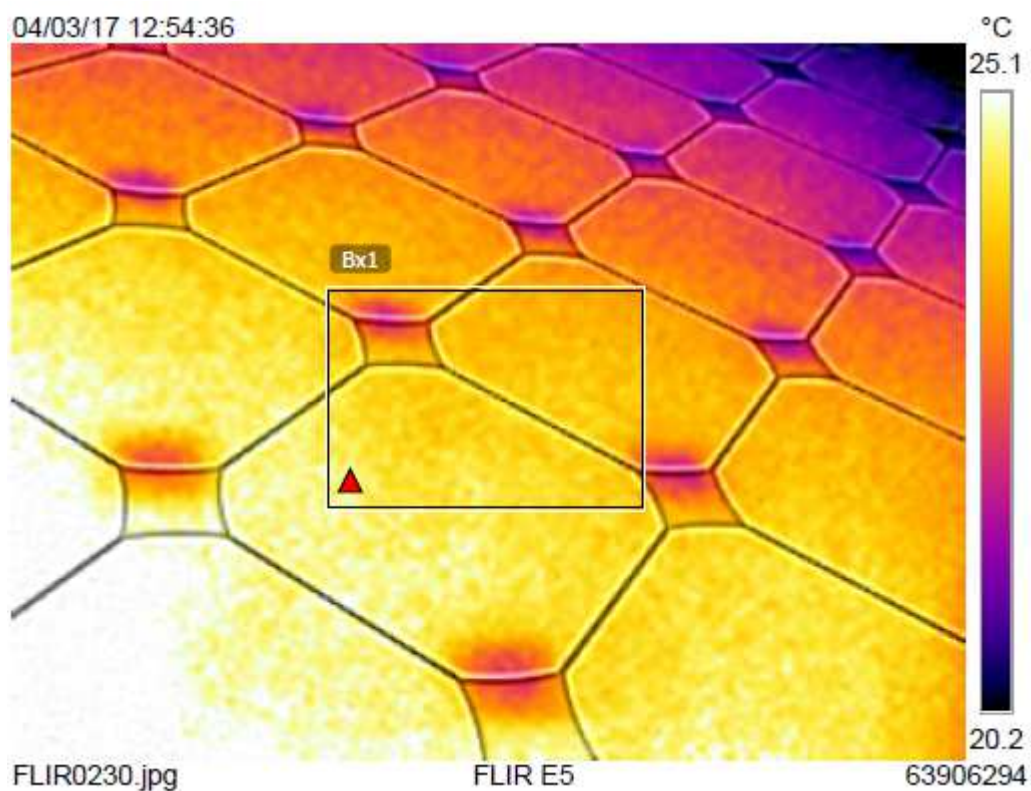
Na spodní straně FVE je umístěna ochrana proti sněhu, toto může mít vliv na přirozený chlazení FVE. Boční strany jsou odkryté, podle údajů o proudění vzduchu v dané lokalitě je převážně proudění ve směru jiho-západ, proudící vzduch se tedy pod panely dostane. Jako doporučení zde uvádím provést měření pomocí termovizní kamery za velmi teplého počasí a stanovit, zdali dochází ke správnému chlazení panelů.

7.2.3 Termovizní analýza

Snímání panelů bylo prováděno 4. 3. 2017. Atmosférické podmínky nebyly ideální, byla vysoká oblačnost, teplota okolí 14 °C. Přesto, že na panely nedopadalo velké množství slunečního záření, byly pořízeny snímky z termovizní kamery. Jako měřicí přístroj byla použita termovizní kamera FLIR E5.

Za takovýchto podmínek nejsou snímky úplně směrodatné, dalším limitním faktorem byl přístup k samotným panelům, nasnímání jednotlivých panelů bylo problematické. Snímky nebyly pořizovány pod správný úhlem ani v ideální vzdálenosti, provedené měření může být zatíženo chybou. Vizuální kontrola panelů ukázala, že jsou ve velice dobrém stavu. Čistota plochy samotných panelů byla v dané situaci velice dobrá bez známek zaprášení.

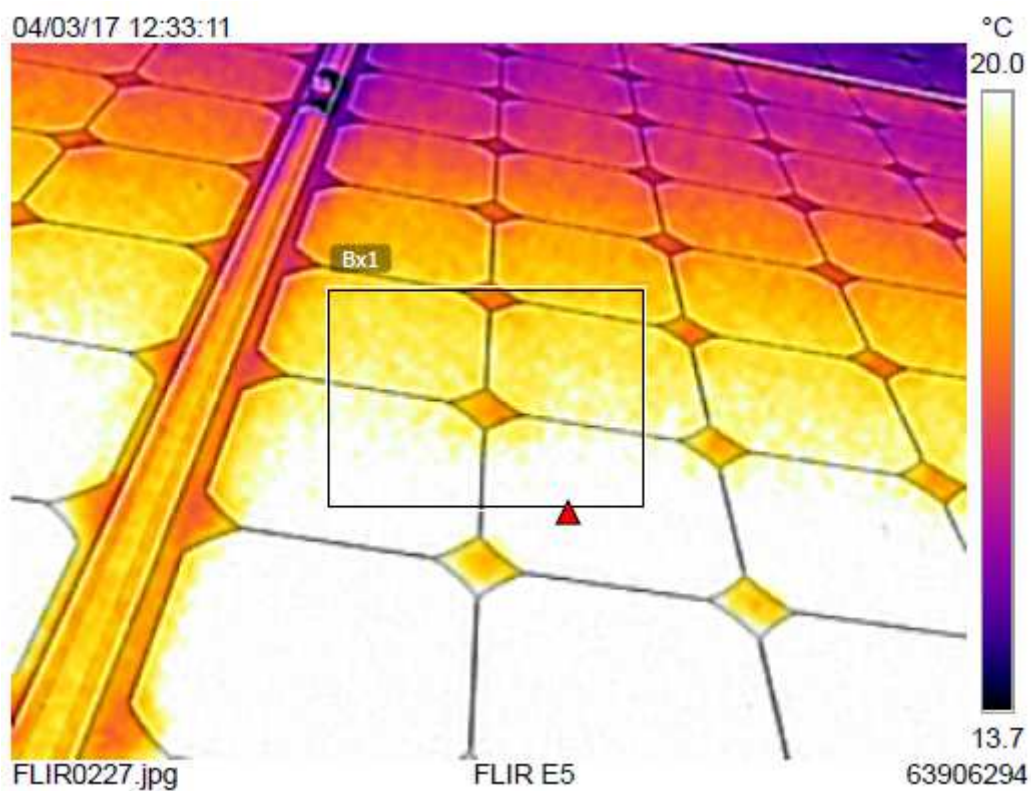
⁴ Podle evropské normy



Obr. 7-13 Snímek 1, FVE 2, jižní strana



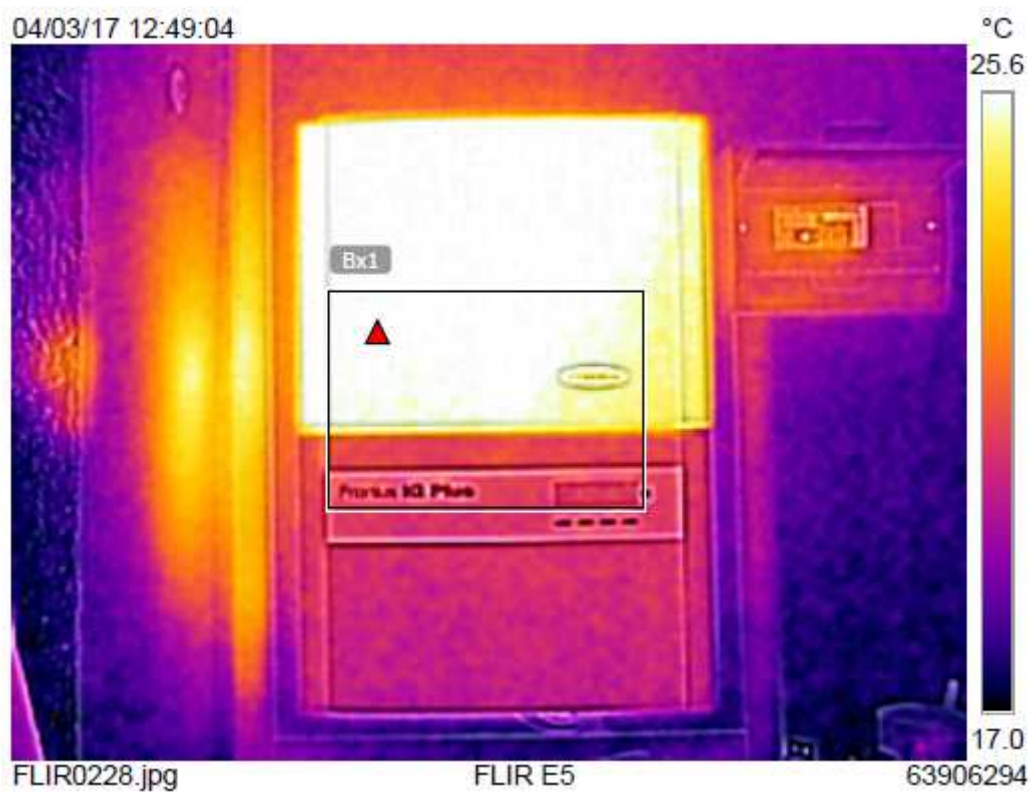
Obr. 7-14 Snímek 1, FVE 2, jižní strana



Obr. 7-15 Snímek 2, FVE 2, jižní strana



Obr. 7-16 Snímek 2, FVE 2, jižní strana



Obr. 7-17 Snímek 3, FVE 2, invertor



Obr. 7-18 Snímek 3, FVE 2, invertor

Na obrázcích 7-13 až 7-16 jsou vyfoceny části panelů, ty nevykazují žádné povrchové znečištění, které by se projevy chladnějšími místy. I za nepříznivých slunečních podmínek je vidět, že mají panely vyšší teplotu než okolí a to i se započtením korekce termokamery. Rozdíl teploty oproti okolí činí cca. 7 °C. Ze snímků je patrné ideálně rovnoměrně rozložení povrchové teploty, pokud se některá místa zdají chladnější, je to způsobeno polohou snímání. Vizualizní kontrola i termovizní analýza nevykazuje na snímaném povrchu žádné chyby panelu, vzhledem k velice dobrému stavu panelů se nepředpokládá, že při vyšších teplotách se objeví nějaké chyby panelu.

Vzhledem k podmínkám měření je na obrázcích 7-17 a 7-18 nasnímán i invertor. Z termovizního snímku je patrné, že výkonová část se skoro rovnoměrně zahřívá. Výkonová část střídače je zajištěná proti neodbornému otevření a po domluvě s vlastníkem bylo stanoveno, že není vhodné a pro potřeby práce nutné tuto část otevřít. Ze snímku je tedy pouze patrné, že chlazení výkonové části střídače dobře zvládnuté, teplota je rovnoměrně rozložena a nedochází k výraznému zahřívání výkonové části střídače.

7.2.4 Výkonové měření

Měřená FVE je vybavena střídačem Fronius IG 50 PLUS, který je jednofázový. Instalované řešení nemá žádný uchovávaný záznam dodávaného výkonu, všechny hodnoty jsou zobrazovány „on-fly“. Oproti měření na FVE 1 však střídač zobrazuje mnohem více hodnot, jako jsou U_{DC} , I_{DC} , U_{AC} , I_{AC} a P_{AC} . Tyto hodnoty byly ručně odečítány v minutových intervalech přímo z panelu měniče a zaznamenány do tabulky níže. P_{DC} a η jsou vypočítané hodnoty.

Tab. 7-2 Zaznamenaná data z FVE 2

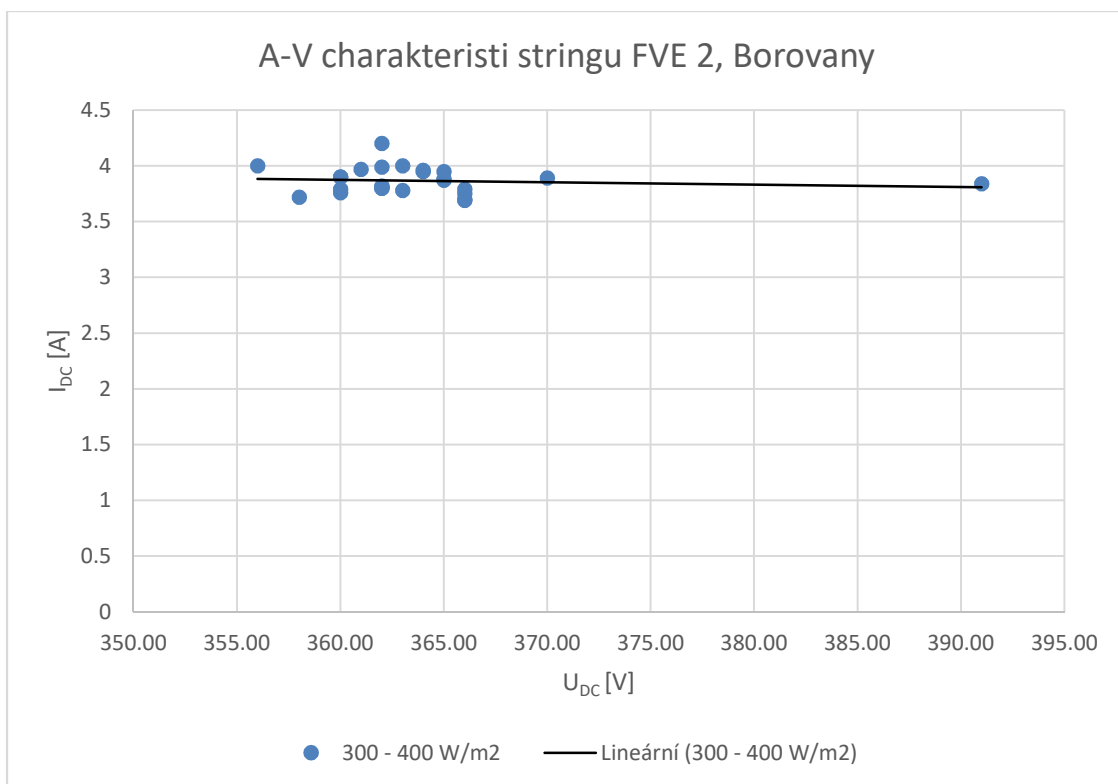
čas	U_{DC} [V]	I_{DC} [A]	P_{DC} [W]	U_{AC} [V]	I_{AC} [A]	P_{AC} [W]	η [%]	f [Hz]
12:35	358.00	3.72	1331.76	237.00	5.29	1253.73	94.14	50
12:36	362.00	3.8	1375.60	237.00	5.29	1253.73	91.14	50
12:37	362.00	3.81	1379.22	238.00	5.31	1263.78	91.63	50
12:38	366.00	3.75	1372.50	238.00	5.30	1261.40	91.91	50
12:39	360.00	3.76	1353.60	238.00	5.31	1263.78	93.36	50
12:40	360.00	3.79	1364.40	240.00	5.29	1269.60	93.05	50
12:41	363.00	3.78	1372.14	237.00	5.29	1253.73	91.37	50
12:42	362.00	3.8	1375.60	237.00	5.31	1258.47	91.49	50
12:43	362.00	3.82	1382.84	238.00	5.31	1263.78	91.39	50
12:44	366.00	3.79	1387.14	238.00	5.30	1261.40	90.94	50
12:45	366.00	3.69	1350.54	237.00	5.33	1263.21	93.53	50
12:46	366.00	3.70	1354.20	237.00	5.32	1244.00	91.86	50
12:47	391.00	3.84	1501.44	237.00	5.68	1311.00	87.32	50
12:48	360.00	3.90	1404.00	237.00	5.71	1349.00	96.08	51
12:49	360.00	3.90	1404.00	238.00	5.70	1362.00	97.01	50
12:50	361.00	3.97	1433.17	238.00	5.73	1361.00	94.96	50
12:51	356.00	4.00	1424.00	238.00	5.75	1368.50	96.10	50
12:52	364.00	3.95	1437.80	238.00	5.71	1358.98	94.52	50
12:53	364.00	3.96	1441.44	237.00	5.71	1353.27	93.88	50

12:54	363.00	4.00	1452.00	240.00	5.75	1380.00	95.04	50
12:55	362.00	4.20	1520.40	240.00	5.77	1384.80	91.08	50
12:56	362.00	3.99	1444.38	238.00	5.75	1368.50	94.75	50
12:57	365.00	3.87	1412.55	239.00	5.68	1357.52	96.10	50
12:58	365.00	3.88	1416.20	239.00	5.68	1357.52	95.86	50
12:59	370.00	3.89	1439.30	239.00	5.68	1357.52	94.32	50
13:00	365.00	3.95	1441.75	239.00	5.71	1364.69	94.66	50

Podle technických specifikací dosahuje použitý měnič maximálně 95 % účinnosti, tento parametr je v časech 12:48, 12:49, 12:51, 12:57 a 12:58 překročen. Jedná se o chybu měření a výpočtu, vcelku se však účinnost střídače pohybuje mírně pod technickou hranicí účinnosti. Po celou dobu měření se dařilo střídači držet frekvenci sítě, což svědčí ho jeho dobré kondici. Z norem pro kvalitu dodávané energie do sítě je složitější a podmínky provádění měření pomocí samotného střídače nejsou pro toto kvalitativní měření vhodné, ne-li přímo nevyhovující, kdy se uvádí percentily výskytu různých frekvencí, pro zjednodušení se dá uvažovat s rozkmitem frekvence 47 – 52 Hz, kde tento interval je hraniční a musí být plněn již zmíněný percentil výskytu odchylek do síťové frekvence. Cokoliv mimo něj je závažné porušení podmínek.

Výstupní napětí měniče se měnilo v rozmezí – 3 V. Dle podle norem se kvalita dodávané elektrické energie do sítě pohybuje v rozmezí ± 2 %, což odpovídá rozkmitu $\pm 4,6$ V u jednofázového provedení.

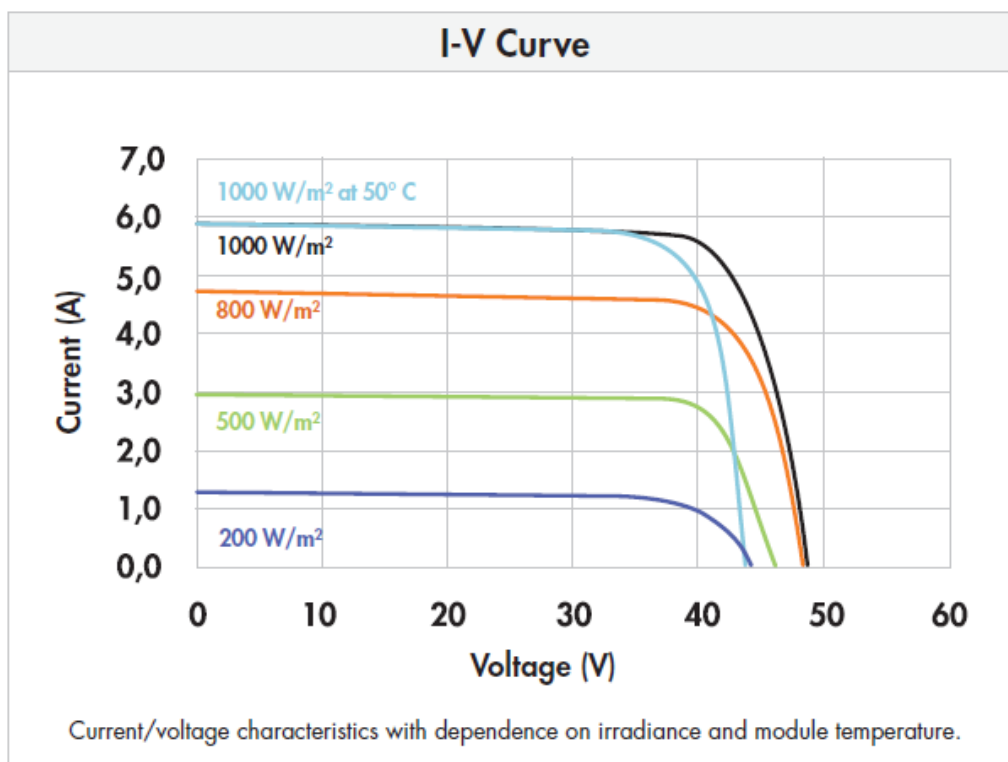
Dále z dostupných hodnot byla sestavena A-V charakteristika celého stringu, ta je znázorněna v grafu 7-7 níže.



Graf 7-7 Průběh části A-V charakteristiky FVE 2

Vnitřní zapojení stringu podle dostupné dokumentace odpovídá paralelnímu zapojení devíti panelů v sérii. Tomu odpovídá i napětí a proud na DC straně měniče při intenzitě dopadajícího záření v rozmezí 300 – 400 W/m². Důležitým parametrem, je že DC proud a napětí v A-V charakteristice vykazuje jistou linearitu v měřeném intervalu za mírně proměnné intenzity záření. Podle zapojení odpovídá teoretický pracovní bod U_{mpp} hodnotě 369 V a I_{mpp} hodnotě 10,98 A.

Na obrázku 7-19 je znázorněna A-V charakteristika jednoho použitého typu panelu. Z naměřených hodnot lze soudit, že část změřené charakteristiky vypovídá o správné funkčnosti všech panelů, tento závěr podporují i snímky z termovizní analýzy a vizuální kontrola FVE.



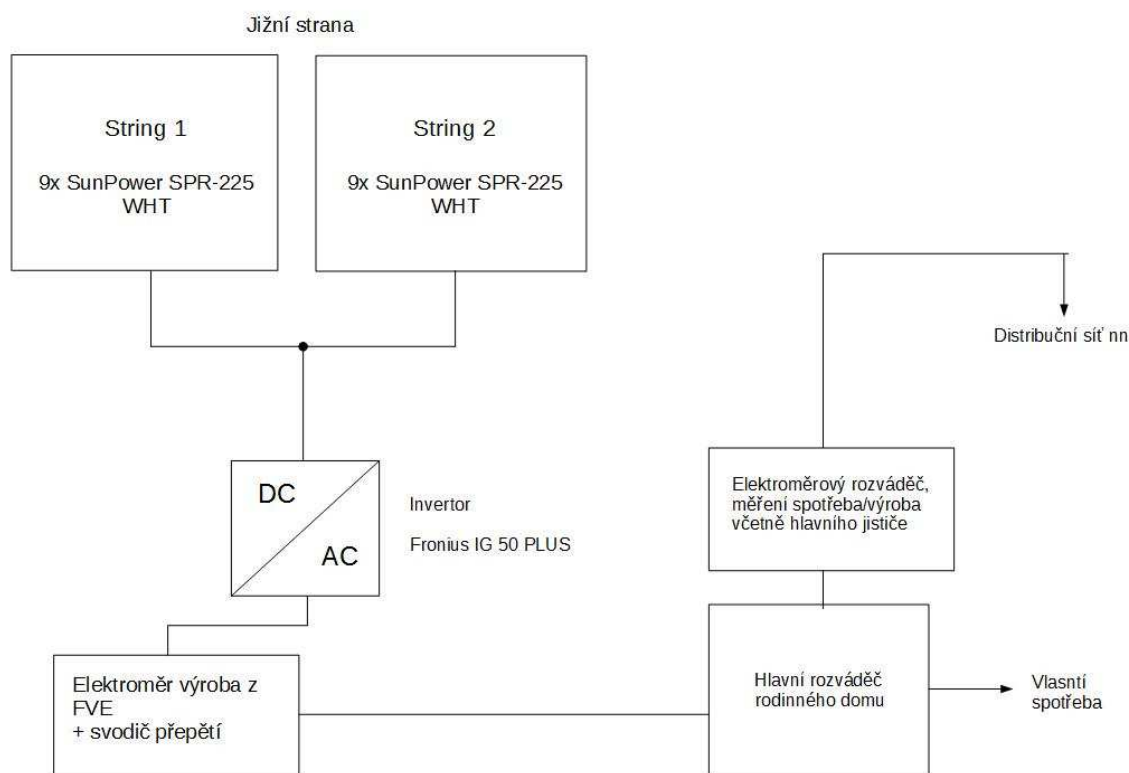
Obr. 7-19 A-V charakteristika panelu SunPower SPR 225 WHT

Dále o dobré kondici elektrárny svědčí dodávaný výkon do sítě, kde i při vysoké oblačnosti dodává elektrárna cca. 32 % instalovaného výkonu. Na celkovou výrobu energie má nezanedbatelný vliv i dispoziční umístění elektrárny na jižní stranu.

7.2.5 Elektrické zapojení FVE

Elektrárna je zapojena v provedení tzv. Zeleného bonusu, kdy vlastník využívá vyrobenou elektřinu pro vlastní spotřebu a přebytky výroby prodává do sítě.

Jedná se o klasické a účelné zapojení. Jediným nedostatkem je umístění svodiče přepětí až střídačem. Následkem čehož může v případě přepětí, které přijde od panelů případně DC vedení projít až za střídač a tím ho poškodit. Zvolený měnič má však v sobě integrovanou ochranu včetně svodiče přepětí, což eliminuje poškození měniče samotného.



Obr. 7-20 Blokové schéma zapojení FVE 2, Borovany

8 ZÁVĚR

Předmětem práce bylo stanovit různé parametry, které mají vliv na výkon a účinnost FVE elektrárny. V teoretickém úvodu jsou zmiňovány nejčastější způsoby diagnostik FVE a zmíněny parametry, které mají vliv na účinnost FVE. Parametry, které nejvíce ovlivňují výkon elektrárny, se dají rozdělit do několika hlavních faktorů. Mezi tyto faktory se řadí dispoziční umístění elektrárny, mechanické uspořádání elektrárny a elektrické veličiny jednotlivých panelů a dalších zařízení, které jsou součástí elektrárny.

Přestože je cílem práce určení parametrů, které ovlivňují její výkon, je nutné upozornit na to, že při samotném měření v terénu, neboli in-situ jsou podmínky, které znemožňují provést podrobná a rozsáhlá měření. Všeobecné parametry, které mají největší vliv na výkon jednotlivých parametrů, jsou známy a dobře popsány ve velkém množství literatury. Zde se však dostáváme k problému, že některé parametry, zejména ty elektrické nelze jednoduše na fungující elektrárně proměřit. V teoretickém úvodu jsou tyto veličiny popsány a vysvětleny. V laboratorních podmínkách a v případě použití jednoho panelu se jedná o snadný úkol u měření v terénu nikoliv.

Níže budou popsány nejvíce ovlivňující parametry, které vychází i reálné měření v terénu spolu se zhodnocením stavu měřené elektrárny.

Nejvíce limitující parametr je samotné umístění a orientace panelů. Jedná se o sklon a orientaci panelů vůči Slunci. Pro české podmínky platí, že nejideálnější případ instalace je na jižní stranu a se sklonem panelů pod úhlem 35 °. Orientace a umístění je však většinou řešena již v rámci projektu, kdy se určí nejvhodnější umístění panelu a toto se musí v případě diagnostiky brát jako konstantní parametr.

V případě prováděného měření v případě FVE 1 se však ukazuje, že zvolená instalace rozdělení dvou stringů na východní a západní stranu nepředstavuje nikterak ohromnou ztrátu na vyrobeném výkonu, v literatuře a výsledku z jiných praktických měření se ukazuje, že toto má vliv na výkon do 10 %. K tomuto se váže i další parametr a to je zastínění povrchu panelů okolím, například i komín, který vrhá stín na panely, dokáže snížit výkon, stejně tak okolní vzrostlá zeleň. V případě instalací panelů na šikmé střeše se nezohledňuje parametr vlastního zastínění. Pokud je však střecha plochá, jsou panely instalovány na pomocných konstrukcích v určité vzdálenosti. V takovém případě může docházet při nedodržení vzdáleností k vlastnímu zastínění panelů a razantně tak může dojít ke snížení výkonu.

Dalším parametrem, který ovlivňuje výkon elektrárny je čistota panelů. Vzhledem k tomu, že jsou panely instalovány pod úhlem, který se snaží přiblížit optimálnímu sklonu 35 °, je zajištěn tzv. samočistící efekt. V tomto případě je však nutné upozornit, že čištěním panelů například košťátkem může způsobit poškození krycí vrstvy a nastartovat tak rychlejší degradaci panelu. K extrémním případům může docházet během zimních měsíců, kdy jsou FVE sice schopny dodávat určitý výkon, v řádech desítek až stovek wattů v závislosti na velikosti instalovaného výkonu, ale vlastníci v honbě za výrobou elektřiny například oškrabávají námrazu z povrchu panelů. V tomto případě dojde k nevratnému poškození, ztrátě výkonu a urychlené degradaci panelu a samozřejmě ke ztrátě záruky. Oplachování panelů vodou je také špatný postup, v případě že je panel rozpálený. Ze snímků termovizní kamery na FVE 1 je patrné, že i při teplotě okolí okolo 20 °C a přímém slunečním záření jsou panely „rozpáleny“ na mnohem vyšší teplotu. Na proměřené FVE 1 se provozní teplota blížila 40 °C, v letních měsících jsou provozní teploty ještě vyšší. Standardní provozní teplota panelů je v technických specifikacích uváděna řádově 50 °C. Při políti panelu

studenou vodu dojde k mechanickému pnutí uvnitř panelu a opět může dojít k nevratnému poškození, ztrátě záruky a rapidnímu snížení výkonu.

Přirozené chlazení panelu je také důležitý parametr, ten zajišťuje samovolné proudění vzduchu kolem panelu. V případě, že se panel špatně chladí, dochází k jeho přehřívání, degradaci elektrického výkonu a při dlouhodobém vystavení vysokým teplotám nastává i nezvratná mechanická degradace materiálů.

Elektrické parametry, které ovlivňují výkon FVE jsou většinou způsobeny již mechanickým poškozením panelu, které jsou vidět z termovizní analýzy. Samotná diagnostika elektrických parametrů v případech malých elektráren má však své limity. Například proměření A-V charakteristiky panelu, nebo změření odporu R_s a R_p panelu je bez speciálních přístrojů a přístupu k junction boxům naprosto nereálné. V naprosté většině instalací jsou nainstalovány těsně pod spodní částí panelu, splňují vysoký stupeň krytí IP a prostor pro manipulaci a otevření bez speciálního přístupu není možný.

V případě A-V charakteristiky daného panelu a její následné porovnání s výrobcem udávanými hodnotami je v terénu zatíženo chybou a to zejména z důvodu kolísavého charakteru intenzity slunečního záření a proměnou teplotou panelu. Toto se dá sice eliminovat přepočtem na STC podmínky, ale ruční provedení měření je skoro nereálné. Dále je nutné změřit hodnoty U_{OC} a I_{SC} pro stanovení limitních podmínek panelu. Jak již bylo zmíněno, svorkovnice nejsou lehce přístupné a proto se jako možný způsob proměření A-V charakteristiky jeví proměřit ji pro celý string. Z těchto hodnot se pak dá odhadnout se znalostí průběhu výkonu, zda je někde ve stringu porucha. Celou věc však komplikuje skutečnost, že vnitřní uspořádání panelů je vybaveno ochrannými by-passovými diodami. By-passová dioda brání zničení jednotlivých fotočlánků, v případě, kdy by přes ně měl procházet zpětný proud. Nicméně právě toto obtékání článku se projevuje jako ztráta výkonu, resp. pokles napětí a proudu, které pak neodpovídají A-V charakteristice uváděné výrobcem.

Další elektrická část FVE, která má vliv na výkon elektrárny je střídač, který slouží k přeměně stejnosměrného napětí na napětí střídavé o síťových parametrech. Střídače dosahují účinnosti cca. 95 %. Dodávané střídače ve většině případů fungují jako „black box“. Každý výrobce střídače má své řešení, v případě provádění měření na FVE 1 umožňoval střídač zobrazovat pouze dodávaný střídavý výkon, jiné parametry nezobrazoval, ale byl propojený do databáze do které ukládal vzorkovaná data. V případě FVE 2 střídač umožňoval pouze zobrazování aktuálních hodnot, včetně napětí a proudu, frekvence a výkonu. Vzhledem k tomu, že dodávané střídače jsou certifikované pro evropský trh, splňují normy na kvalitu dodávané energie. V rámci diagnostiky jednotlivých elektráren jsem zvolil přístup vycházet z údajů, které je možné zjistit přímo na místě a následně tyto data vyhodnotit. Co se týče harmonického zkreslení, tak malé FVE nemají takový význam, aby byly schopné ovlivnit kvalitu elektrické energie v síti. Samotná diagnostika kvality energie je velice náročná a v tomto případě není úplně průkazná a vlastníkově FVE neposkytuje žádné cenné údaje.

Výše byly popsány parametry, které ovlivňují výkon FVE a na dvou měřených elektrárnách bylo provedené měření, které provedlo zhodnocení stavu elektrárny. Posledním důležitým parametrem elektrárny, který ovlivňuje do jisté míry i výkon je technická kvalita panelů a střídače. Zde platí, že pořízení malé fotovoltaické elektrárny je dlouhodobá investice s návratností v lepším případě 20 let. Proto by se měly používat kvalitní panely od renomovaných výrobců, které garantují dlouhou životnost panelu. Dnes platí, že životnost kvalitního panelu je 25 a více let. V porovnání s levnými čínskými výrobci, kteří jsou schopni nabídnout levnější panely o stejných parametrech

je problémovým faktorem rychlejší degradace výkonu. Provozem elektrárny a vlivem faktorů, které byly popsány výše a v předchozích kapitolách dochází k postupnému snižování výkonu elektrárny, toto má i prováděná servisní diagnostika odhalit. U kvalitních panelů, použitých u obou elektráren výrobce garantuje 25 let záruku na dodávaný výkon. Je samozřejmé, že tento parametr ve skutečnosti nebude takto vysoký, na základě provedených měření na elektrárnách, však můžu konstatovat, že elektrárna, která je v provozu od r 2009 je stále na dobrých výkonových parametrech.

Praktické měření bylo provedeno na dvou vzorcích malých fotovoltaických elektráren do výkonu 10 kW_p. Jako nejvhodnější způsob diagnostiky malých elektráren je termovizní diagnostika. A to zejména z důvodu, že měřící přístroje jsou snadno dostupné, zejména cenově. Při termovizní analýze se neurčují přímo fyzikální veličiny, které ovlivňují výkon elektrárny, ale hledají se kritická místa, resp. vady panelů, které ovlivňují výkon. Pomocí termovizní analýzy se zjišťují, jak mechanické vady samotného panelu, tak i elektrické. Problém samotné diagnostiky pomocí termovizní kamery je ten, že v případě instalace malé FVE jsou panely umístěny ve většině případů na střechách rodinných domů či stodol a podobně a tedy je přístup náročný.

Dalším vhodným ukazatelem pro servisní diagnostiku jsou zaznamenávané údaje o výrobě elektřiny. V případě FVE 1, kdy střídač měl vlastní databázi výroby je v samotném vyhodnocení vidět, že elektrárna správně reaguje na osvětlení panelů a dodává odpovídající výkon. V tomto případě se může samotná diagnostika provádět několikrát za rok a porovnávat vyhodnocená data z předchozím obdobím. V případě FVE 2 jsou dostupná pouze aktuální výrobní data bez záznamu a bez dalších měřících systému není zcela možné porovnávat data v jednotlivých obdobích.

Závěrem lze tedy říci, že pro provedení zběžné servisní diagnostiky malé FVE je provedení analýzy panelů pomocí termovizní kamery a porovnání měřených dostupných dat, pokud budou provedená měření vykazovat nedostatky, musí se přistoupit k dalším podrobnějším měřením, které však budou mít za následek zasáhnutí do zařízení ve vlastnictví provozovatele. V tomto případě je pak už pouze na zvážení vlastníka zařízení jakým způsobem přistupovat k zjištěným nedostatkům a uvedeným doporučením. Obě diagnostikované elektrárny však vykazují dobrý stav a nepředpokládá se u nich snížená výroba elektřiny. V případě opakovaného měření po cca. ročním intervalu lze dále určit zda elektrárna vykazuje nějaké snížení výkonu.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Kolektiv autorů, ČEZ, a.s.. *Obnovitelné zdroje energie a možnosti jejich uplatnění v ČR* [online]. Praha: CRUX, 2007 [cit. 2017-04-16].
- [2] Solargis.info [online]. Bratislava: GeoModel Solar, 2010 [cit. 2016-01-26]. Dostupné z: <http://solargis.info/doc/free-solar-radiation-maps-GHI#top>
- [3] Transformační technologie: Sluneční záření jako zdroj energie [online]. Brno: Jiří Škorpík, 2010 [cit. 2016-01-26]. Dostupné z: <http://www.transformacni-technologie.cz/slunecni-zareni-jako-zdroj-energie.html>. ISSN 1804-8293.
- [4] DRÁBOVÁ, Dana a Václav PAČES. *Perspektivy české energetiky: současnost a budoucnost*. Vyd. 1. Praha: Novela bohemia, 2014, 335 s. ISBN 978-80-87683-26-2
- [5] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. *Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. Vyd. 1. Brno: VUTIUM, 2000, xxiv, 1198, [52] s. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 80-214-1869-9.
- [6] MASTNÝ, Petr. *Obnovitelné zdroje elektrické energie*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04937-2.
- [7] VANĚK, Jiří; KŘIVÍK, Petr; NOVÁK, Vítězslav. *Alternativní zdroje energie*. Brno, 2006. 149 s. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [8] STRNADEL, Jan. *Využití termovize při detekci defektních panelů ve fotovoltaických systémech*. Brno, 2012. 74 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.
- [9] BUDÍN, Jan. *Evropská solární energetika – základní statistiky a očekávaný vývoj*. In: Oenergetice.cz [online]. [cit. 2016-04-04]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/obnovitelne-zdroje/evropska-solarni-energetika-zakladni-statistiky-a-ocekavany-vyvoj/>
- [10] BERANOVSKÝ, Jiří a Jan TRUXA. *Alternativní energie pro váš dům*. 2., aktualiz. vyd. Brno: EkoWATT, 2004. Edice 21. století. ISBN 80-86517-89-6
- [11] *Sluneční konstanta*. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-04-07]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Sluneční_konstanta
- [12] *Optimální orientace a sklon fotovoltaických panelů*. Tzb info [online]. [cit. 2017-04-08]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/114865-optimalni-orientace-a-sklon-fotovoltaickych-panelu>
- [13] MARTYNEK, A. *Degradační testy polymerních materiálů vystavených elektrickému poli*. Brno, 2008. 50 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Vaněk, Ph.D. FEKT VUT v Brně