

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

Specifika připojení fotovoltaické elektrárny do distribuční
soustavy vn v České republice

2016/2017

Bc. Petr Novák



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Katedra elektroenergetiky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Specifika připojení fotovoltaické elektrárny do distribuční
soustavy vn v České republice**

**Specifics of connecting a photovoltaic power plant to the
highvoltage distribution grid in the Czech Republic**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Elektroenergetika

Autor diplomové práce: Bc. Petr Novák

Vedoucí diplomové práce: Ing. Vít Klein, Ph.D.

Praha 2017

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Novák Jméno: Petr Osobní číslo: 393376
Fakulta/ústav: Fakulta elektrotechnická
Zadávající katedra/ústav: Katedra elektroenergetiky
Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Studijní obor: Elektroenergetika

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Specifika připojení fotovoltaické elektrárny do distribuční soustavy vn v České republice.

Název diplomové práce anglicky:

Specifics of connecting a photovoltaic power plant to the high-voltage distribution grid in the Czech Republic.

Pokyny pro vypracování:

- 1) Fotovoltaické elektrárny (FVE) v současné energetice České republiky.
- 2) Popis a specifika jednotlivých komponent fotovoltaické elektrárny včetně zařízení k připojení elektrárny do distribuční soustavy vn.
- 3) Vytvoření matematického modelu FVE včetně zařízení k připojení elektrárny do distribuční soustavy vn pomocí softwaru MATLAB.
- 4) Analýza ekonomické efektivnosti FVE za dobu jejího celého životního cyklu v podmínkách České republiky.

Seznam doporučené literatury:

1. LIBRA, Martin a Vladislav POULEK. Fotovoltaika: teorie i praxe využití solární energie. 2., dopl. vyd. Praha: Ilsa, 2010. ISBN 978-80-904311-5-7.
2. HRADÍLEK, Zdeněk. Elektroenergetika distribučních a průmyslových zařízení. Ostrava: Vydala VŠB-TU Ostrava ve vydavatelství Montanex, 2008. ISBN 978-80-7225-291-8.
3. BOYLE, Godfrey. Renewable electricity and the grid: the challenge of variability. Sterling, VA: Earthscan, c2007. ISBN 9781844074181.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Vít Klein Ph.D., katedra elektroenergetiky FEL

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

Datum zadání diplomové práce: 28.09.2016

Termín odevzdání diplomové práce: 09.01.2017

Platnost zadání diplomové práce: 28.02.2018

Podpis vedoucí(ho) práce

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

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

V Praze dne

podpis

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu práce Ing. Vítu Kleinovi, Ph.D. za cenné rady, věcné připomínky a vstřícnost při konzultacích a vypracování mé diplomové práce. Poděkovat bych chtěl také panu docentovi Zdeňkovi Müllerovi a panu inženýrovi Lubomíru Musálkovi za pomoc a rady při zpracování matematického modelu. Mé díky také patří Bc. Barboře Drahorádové za grafickou pomoc.

V neposlední řadě bych rád poděkoval své rodině, přátelům a mé přítelkyni, kteří mě podporují po celou dobu mého studia a kteří mi umožňují se dále rozvíjet a zlepšovat se jak ve škole, tak i v osobním životě.

Název diplomové práce:

Specifika připojení fotovoltaické elektrárny do distribuční soustavy vn v České republice

Anotace

Tato diplomová práce má za úkol zmapovat současnou situaci využívání fotovoltaických systémů v České republice a na základě výpočtů rozhodnout, zdali jsou tyto systémy v našich podmínkách výhodné. Na úvod jsou zmíněny nejdůležitější legislativní, společenské a politické aspekty této problematiky. Do souvislostí je dán současný stav situace s historickým vývojem. Práce se také zaměřuje na nejdůležitější vlastnosti jednotlivých prvků fotovoltaických systémů, které jsou potřeba k vytvoření modelu fotovoltaické elektrárny v matematickém softwaru MATLAB Simulink. Přílohou k této práci je i vytvořený univerzální ekonomický model běžného fotovoltaického systému. Naší modelovou elektrárnu jsem podrobil ekonomické analýze tímto nástrojem, abychom určili, zdali by tato elektrárna byla v našich podmínkách realizovatelná.

Klíčová slova

Fotovoltaická elektrárna, Distribuční soustava, Obnovitelné zdroje energie, Matematický model, Ekonomický model

Master's Thesis title:

Specifics of connecting a photovoltaic power plant to the high voltage distribution grid in the Czech Republic

Annotation

The mission of this diploma thesis is to describe the actual situation of photovoltaic systems in the Czech Republic and decide on the basis of the results of the models if the systems are profitable under our country's conditions. At the beginning of this document the main legislative, social and political aspects are mentioned and historical development is described. The most important characteristics of the photovoltaic system's components are discussed due to modelling our photovoltaic power plant in mathematical Software MATLAB Simulink. Attachment of this thesis is also a universal tool for economic analysis of photovoltaic power plant. I have used this economical tool to decide whether our power plant is profitable or not.

Key Words

Photovoltaic power plan, Distribution grid, Renewable sources of energy, Mathematical Model, Economical Model

Obsah

Seznam symbolů a zkratk	1
1 Úvod	3
2 Fotovoltaické elektrárny (FVE) v současné energetice České republiky	4
2.1 Energetika v České republice	4
2.1.1 Energetický mix České Republiky	5
2.1.2 Fotovoltaické elektrárny v ČR	7
2.2 Obnovitelné zdroje energie ve světě	9
2.2.1 Fotovoltaické elektrárny ve světě	10
2.3 Role OZE v energetice ČR	10
2.4 Legislativa fotovoltaických elektráren v České republice	11
2.4.1 Dotační programy v České republice	12
2.4.2 Certifikáty a normy pro fotovoltaické panely	13
2.4.3 Státní energetická koncepce	14
2.5 FVE jako nástroj decentralizace a Smart grid	14
3 Popis a specifika jednotlivých komponent fotovoltaické elektrárny včetně zařízení k připojení elektrárny do distribuční soustavy vn	16
3.1 Významné milníky v solární energetice	16
3.2 Slunce jako zdroj energie na Zemi	17
3.3 Možnosti využití solárního záření pro energetické účely	20
3.4 Schéma fotovoltaické elektrárny	21
3.5 Fotovoltaické pole	22
3.5.1 Fotovoltaický článek	22
3.5.2 Standardní testovací podmínky	27
3.5.3 Solární panely (moduly)	27
3.5.4 Svorkovnice	29
3.5.5 Nosné konstrukce	29
3.6 Střídače	31
3.7 Kabely	33
3.8 Transformátor	33
3.9 Měřicí zařízení elektrické energie	34
3.10 Odpínače a ochrany	35
3.11 Defekty fotovoltaických elektráren	35

3.12	Záložní výkon a akumulace	36
3.13	Podmínky připojení do distribuční a přenosové soustavy	36
3.14	Možné vlivy na distribuční soustavu	37
4	Vytvoření matematického modelu FVE včetně zařízení k připojení elektrárny do distribuční soustavy vn pomocí softwaru MATLAB.	38
4.1	Zadání projektu fotovoltaické elektrárny	38
4.2	Určení typů komponentů a jejich počtu	38
4.2.1	Fotovoltaické panely	38
4.2.2	Výkonové měniče	40
4.2.3	Nosné konstrukce.....	41
4.2.4	Kabely	42
4.2.5	Transformátory	43
4.2.6	Ostatní prvky	43
4.3	Vlastní program v matematickém softwaru MATLAB Simulink	43
4.3.1	Popis matematického softwaru	43
4.3.2	Cíl matematického modelu	43
4.3.3	Popis jednotlivých částí modelu	44
4.3.4	Měniče	46
4.3.5	Meziobvod	47
4.3.6	Distribuční soustava	48
4.4	Výsledky matematického modelu	49
4.4.1	Výpočty	49
4.4.2	Porovnání s online nástrojem PVGIS	52
4.4.3	Zhodnocení	53
5	Analýza ekonomické efektivity FVE za dobu jejího celého životního cyklu v podmínkách České republiky.....	54
5.1	Určení nákladů	54
5.1.1	Investiční náklady	54
5.1.2	Provozní náklady.....	55
5.2	Daňové aspekty.....	55
5.2.1	Odpisy	55
5.2.2	Daně z příjmů.....	56
5.2.3	Osvobození od daně z příjmu	56
5.2.4	DPH.....	57
5.3	Určení výnosů	57

5.3.1	Stanovení ceny elektřiny	57
5.3.2	Určení množství elektřiny	57
5.4	Kritéria k zhodnocení investice	58
5.4.1	Doba návratnosti	58
5.4.2	Návratnost investice (ROI).....	58
5.4.3	Čistá současná hodnota (NPV)	59
5.4.4	Vnitřní výnosové procento (IRR)	59
5.5	Modelový příklad	59
5.5.1	Vymezení podmínek ekonomického modelu	59
5.5.2	Náklady.....	60
5.5.3	Výnosy.....	62
5.5.4	Ekonomické ukazatele.....	62
5.5.5	Odpisy	63
5.5.6	Dotace.....	63
5.5.7	Výměna komponentů	63
5.5.8	Meziroční růst cenové hladiny.....	63
5.6	Zhodnocení modelového příkladu z ekonomického hlediska	64
5.6.1	Stanovení Cash flow	64
5.6.2	Kritéria pro hodnocení výnosnosti investičních projektů.....	67
5.6.3	Citlivostní analýzy	68
5.7	Zjištění mezních podmínek.....	71
5.7.1	Potřebná garantovaná výkupní cena.....	71
5.7.2	Potřebná výše výroby elektřiny	71
5.7.3	Potřebná výše dotace na výstavbu	71
5.7.4	Potřebná cena jednoho panelu	72
5.8	Zhodnocení	72
6	Závěr	73
7	Seznam použité literatury	74
	Seznam obrázků	80
	Seznam tabulek	81
	Seznam příloh	82

Seznam symbolů a zkratek

AM	Koeficient atmosférické masy (Air Mass coeficient)
b	Wienova konstanta
CCF	Kumulativní cash flow
CDCF	Kumulovaný diskontovaný cash flow
ČNB	Česká národní banka
DCF	Diskontovaný cash flow
D_z	Daň z příjmů
E_I	Množství sluneční energie na m^2 za rok
ES	Energetická soustava
FVE	Fotovoltaická Elektrárna
$I_{\text{člátku}}$	Ozáření článku
I_D	Přímé záření
I_G	Celkové ozáření
I_{mpp}	Provozní proud, při kterém je výkon maximální
IRR	Vnitřní výnosové procento
I_{sc}	Proud nakrátko
I_{sl}	Sluneční konstanta
k_{Isc}	Teplotní koeficient zkratového proudu
k_p	Teplotní koeficient výkonu
$k_{U_{\text{mpp}}}$	Teplotní koeficient U_{mpp}
$k_{U_{oc}}$	Teplotní koeficient napětí naprázdno
LST	Místní sluneční čas
M_e	Intenzita záření povrchu absolutně černého tělesa
MPP	Maximal Power Point – Bod maximálního výkonu
MPPT	Maximal power point tracker – Sledovač MPP
N_o	Daňové odpisy
NOCT	Normální pracovní teplota článku (Normal operating cell temperature)
N_p	Provozní výdaje
NPV	Čistá současná hodnota
$N_{\dot{u}}$	Splacené úroky z úvěrů a obligací
OZE	Obnovitelné zdroje energie
P, O	Připočitatelné a odpočitatelné daňové položky
P_{FVP}	Výkon fotovoltaického panelu
P_{inst}	Instalovaný výkon
P_{max}	Maximální hodnota výkonu za daných podmínek

PPDS	Pravidla provozu distribuční soustavy
$P_{\text{pož}}$	Požadovaný výkon
P_s	Výkon přenášený zářením
PSH	Doba slunečního maxima (Peak sun Hours)
PVGIS	Photovoltaic geographical information systém
Q_{el}	Množství vyrobené elektřiny
Q_{FVPs}	Skutečný počet fotovoltaických panelů
Q_{FVPt}	Teoretický počet fotovoltaických panelů
ROI	Návratnost investice (Return on Investment)
r_s	Poloměr slunce
R_{sz}	Střední vzdálenost Země-Slunce
r_z	Poloměr země
SEK	Státní energetická koncepce
STC	Standardní testovací podmínky
$T_{\text{článku}}$	Teplota článku
T_{sl}	Teplota Slunce
TVSe	Technologická vlastní spotřeba
T_{vzd}	Teplota vzduchu
UL	Maximální napětí systému
U_{mpp}	Provozní napětí, při kterém je výkon maximální
ÚNMZ	Úřad pro normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví
U_{oc}	Napětí naprázdno
V	Příjmy z realizovaného projektu
VSC	Voltage Source Control
$W_{\text{pevný}}$	Obecný výkon systému s pevnou konstrukcí
W_{pohyb}	Obecný výkon systému s pohyblivou konstrukcí
α_s	Úhel slunce nad obzorem
δ	Solární deklinace
ΔP_s	Výkon dopadající na povrch Země
η	Účinnost
θ	Azimutální úhel
λ_{max}	Maximální hodnota vyzařování povrchu Slunce při dané teplotě
σ	Stefanova-Boltzmannova konstanta
τ	Daňová sazba
φ	Zeměpisná šířka
ω	Úhlová rychlost slunce po obloze

1 Úvod

Dnešní svět si dokážeme již jen velmi těžko představit bez elektřiny. Lidé si na komfort spojený s využíváním elektrické energie v běžném životě natolik zvykli, že i krátkodobé přerušení dodávky je schopné ochromit celou společnost. Energetika je velmi důležité odvětví lidské činnosti. Avšak směřování vývoje v energetice nikdy nebylo jednoznačné. Již od dob Thomase Alva Edisona a Nikolajeviče Tesly, kteří se přeli o tom, zdali je lepší stejnosměrný nebo střídavý proud, se vedou neustálé spory o budoucím směřování energetiky. Zdali je lepší centralizovaná výroba nebo decentralizovaná, jestli jsou lepší auta s elektropohonem či se spalovacími motory, zdali jsou lepší elektrárny na fosilní paliva nebo využívání obnovitelných zdrojů a takto bychom mohli pokračovat dále. V současné době vévodí světu využívání energie z fosilních paliv, avšak okolnosti nás nutí hledat nové alternativy. Bohužel energetika je zároveň i odvětvím s velkou setrvačností a tudíž nelze provádět změny ze dne na den. Avšak tenčící se zásoby fosilních paliv, zvyšování koncentrace skleníkových plynů v atmosféře a další bezpečnostní rizika nás občas nutí dělat rychlá opatření, na která není současný stav energetiky připraven a která přinášejí s sebou i některé komplikace.

V současné době se po celém světě šíří trend využívání obnovitelných zdrojů energie. Tento trend se nevyhnul ani České republice. Během krátkého období bylo instalováno velké množství fotovoltaických systémů na našem území. Instalovaný výkon se během několika málo let zvětšil téměř o 2 GW. Umožnila to nepromyšlená a nesystémová finanční podpora státu. Stát formou nepřiměřené provozní podpory vybídl investory k masivní výstavbě fotovoltaických elektráren. Když si tuto svojí chybu uvědomil, o několik let později přestal další nové instalace podporovat. Kvůli neadekvátně nastaveným dotacím se fotovoltaické elektrárny dostaly do podvědomí široké veřejnosti. Bohužel nutno říci, že velmi často bývají vnímány spíše negativně. Pravdou ale zůstává, že masivní rozšíření těchto systémů bylo více zapříčiněno politickými tendencemi než přirozeným vývojem trhu. Rozhodně bychom ale neměli na tyto systémy zanevřít, neboť fotovoltaické technologie rozhodně mají světu co nabídnout. Slunce je z pohledu lidstva nevyčerpatelný zdroj energie. V posledních letech probíhá intenzivní vývoj a výzkum v oblasti využívání sluneční energie. Jsou zkoumány nové technologie a hledají se stále nové a nové aplikace využívání fotovoltaických systémů. Základní otázky však stále zůstávají. Jsme my schopni se současnými technologiemi tuto energii efektivně využívat? Je energetika připravena na tuto změnu? Jsou fotovoltaické elektrárny soběstačné a mohou konkurovat elektrárnám na fosilní paliva?

Zejména odpovědi na poslední otázku se bude zabývat tato práce. Pomocí modelového příkladu nové fotovoltaické elektrárny postavené na území České republiky se pokusím zjistit, zdali by tento projekt byl realizovatelný. V případě, že tento projekt za normálních podmínek není realizovatelný, bude mým úkolem stanovit krajní podmínky, za kterých by tento projekt mohl vzniknout.

2 Fotovoltaické elektrárny (FVE) v současné energetice České republiky

2.1 Energetika v České republice

Energetika má v Českých zemích dlouholetou tradici. Počátky můžeme datovat do roku 1888, kdy na našem území vznikla první veřejná elektrárna. Byla jí Křižíkova Elektrárna královského města Písek. Významným milníkem byl rok 1919, kdy byl schválen zákon o vzniku všeužitečných elektrárenských společností. Zákon stanovoval, že pokud byl podnik prohlášen za všeužitečný, tak měl povinnost zásobovat elektřinou na určitém území každého, kdo o to požádal. V této době také byla zavedena pro celou republiku třífázová síť s napětím 3 x 380/220 V a frekvencí 50 Hz. Po druhé světové válce vznikají České energetické závody, které v rozvoji energetiky pokračují. [11]

V období po druhé světové válce je výroba v České republice centralizovaná a stavějí se elektrárny na fosilní paliva o velkých výkonech. Jelikož ze strategických komodit se na našem území nalézaly rozsáhlé zásoby hnědého uhlí, zaznamenaly největší rozvoj zařízení na spalování právě tohoto druhu paliva. Situovány byly u nalezišť uhlí, tedy zejména v pohraničních oblastech na severu Čech, na severu Moravy pak byly stavěny elektrárny spalující černé ostravské uhlí. Avšak v 80. letech nastupuje nový typ energie a to energie jaderná. Roku 1985 je spuštěn první blok jaderné elektrárny Dukovany a o 2 roky později již fungují všechny 4 bloky. Roku 2000 přibyla druhá jaderná elektrárna, elektrárna Temelín. [11] [22]

V roce 2000 byl vydán energetický zákon č.458/2000 Sb.¹, který nastartoval liberalizaci trhu s elektřinou. Ve své podstatě se jednalo o rozdělení výroby, přenosu a distribuce elektrické energie a tudíž vytvoření tržního prostředí v energetickém odvětví. O tom, zdali se v dnešních dnech dá stále o trhu s energiemi mluvit jako o čistě tržním prostředí, by se dalo spekulovat. Různé politické zásahy, ať už se jedná o dotace nebo o sankce, tento trh deformují a z energetiky se tak stává těžko předvídatelné odvětví. [22]

Více jak stoletý vývoj se výrazně promítl do současného energetického mixu naší země. Ten je založen na centralizované výrobě elektrické energie zejména z fosilních paliv, z jaderných reakcí a z energie vody. Dle studie společnosti ČEZ, a.s. z roku 2007, nejsou pro stavbu nových vodních elektráren s instalovaným výkonem nad 10 MW vhodné lokality a podmínky. Můžeme očekávat novou výstavbu hlavně u malých vodních toků s elektrárnami do instalovaného výkonu 10 MW nebo modernizaci stávajících zařízení. Co se týká uhelných elektráren, Tabulka 1 zobrazující seznam největších uhelných elektráren na našem území dokazuje, že většina těchto elektráren byla uvedena do provozu v 70. a 80. letech 20. století. Jejich technologie je mnohdy zastaralá a bez potřebných rekonstrukcí není možné, aby vyhověla novým emisním limitům, které stanovuje Zákon č. 201/2012

¹ Zákon č. 458/2000 Sb., o podmínkách podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích a o změně některých zákonů (energetický zákon). In: *Sbírka zákonů*. Praha, 2000, ročník 2000, 131 a násl.

Sb., o ochraně ovzduší² a Vyhláška č. 415/2012 Sb., o přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování.³

Elektrárna	Lokalita	Celkový instalovaný výkon [MW]	Rok uvedení do provozu	Palivo
Pruněrov II	Pruněrov	1050	1981 - 82	hnědé uhlí
Počerady	Počerady	1000	1970 - 77	hnědé uhlí
Chvaletice	Chvaletice	820	1977 - 78	hnědé uhlí
Dětmarovice	Dětmarovice	800	1975 - 76	černé uhlí
Tušimice II	Tušimice	800	1974 - 75	hnědé uhlí
Mělník III	Horní Počaply	500	1981	hnědé uhlí
Pruněrov I	Pruněrov	440	1967 - 68	hnědé uhlí
Opatovice	Opatovice n. L.	378	1959	hnědé uhlí

Tabulka 1: Seznam největších uhelných elektráren na území ČR^{4,5}

Výstavba nových uhelných bloků je sice plánována, ale na druhou stranu je ukončována činnost jiných bloků, jejichž rekonstrukce by nebyla ekonomicky výhodná nebo již na jejich provoz není dostatek uhlí. Pokud tedy současný trend růstu spotřeby bude pokračovat, bude potřeba hledat nové možnosti získávání elektrické energie. ČEZ, a.s., největší výrobce elektrické energie v České republice, na svých stránkách uvádí:

„I při nejoptimističtější variantě dalšího vývoje ztratí pravděpodobně uhelné elektrárny v závislosti na dostupnosti českého hnědého uhlí v období 2035 - 2050 postupně svůj dominantní význam.“ [12]

O dalším rozvoji využívání jaderné energie se vedou politické a odborné diskuze nejen v ČR, ale v celé Evropě i ve světě.

2.1.1 Energetický mix České Republiky

Energetický mix vyjadřuje podíl primárních nebo případně i sekundárních zdrojů na výrobě elektrické energie resp. tepla. Mezi primární zdroje řadíme přírodní zdroje a mezi sekundární řadíme zdroje, které byly vytvořeny lidskou činností. Typickým příkladem sekundárního zdroje je komunální odpad. Jak již bylo zmíněno v předchozí části, naše energetika je založená na využívání fosilních paliv, jaderné energie a energie vody. V našich podmínkách jsou využívány jaderné a uhelné elektrárny pro pokrytí základního zatížení. Tyto elektrárny jsou nezávislé, tudíž se jedná o účelovou výrobu a jejich výkon lze řídit v čase. Vodní elektrárny jsou poté využívány pro pološpičkové a špičkové zatížení. Pro špičkové zatížení jsou také využívány plynové elektrárny, které sice dovedou nastartovat ze studena velmi rychle, ale mají vysoké provozní náklady v závislosti na ceně zemního plynu.

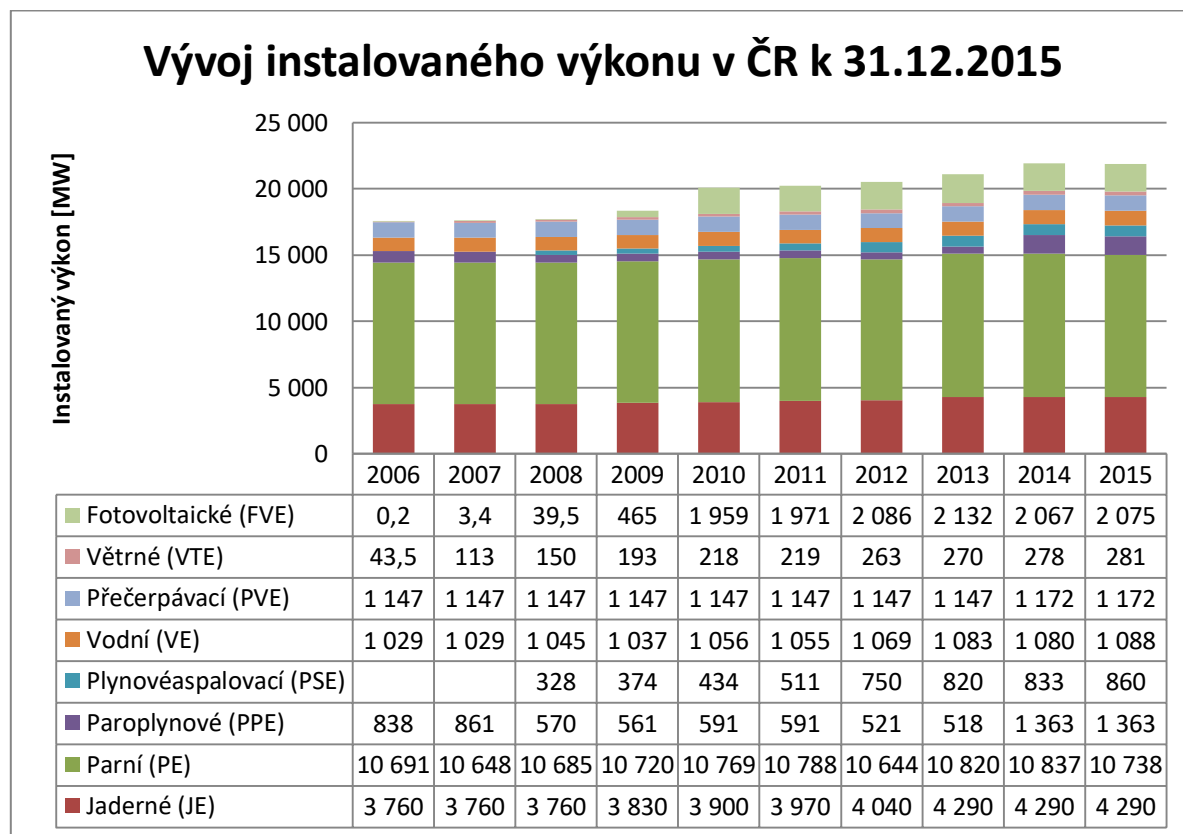
² Zákon č. 201/2012 Sb. Zákon o ochraně ovzduší. In: Sbíрка Zákonů. Praha, 2012, ročník 2012, 69 a násl.

³ Vyhláška č. 415/2012 Sb., o přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší. In: Sbíрка zákonů. Praha, 2012, ročník 2012, 151 a násl.

⁴ ČEZ, a.s. *Uhelné elektrárny* [online]. Praha [cit. 2016-11-20]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/uhelne-elektrarny.html>

⁵ Severní energetická a.s. *Elektrárna Chvaletice* [online]. Most [cit. 2016-11-20]. Dostupné z: <http://www.sev-en.cz/cz/elektrina/elektrarna-chvaletice.html>

Elektrárny využívající k výrobě elektřiny energii slunce a větru a některé typy vodních elektráren jsou brány jako elektrárny závislé. Jejich produkce nemůže být v čase řízena a odvíjí se od přírodních procesů. Bohužel naše geografická poloha není vhodná pro masivní a stabilní výrobu z těchto zdrojů energie. Minimálně v dohledné době bude stále potřeba konvenčních zdrojů energie. Obrázek 1 zobrazuje vývoj instalovaného výkonu v České republice od roku 2006 do roku 2015 v závislosti na typu zdroje. [22]

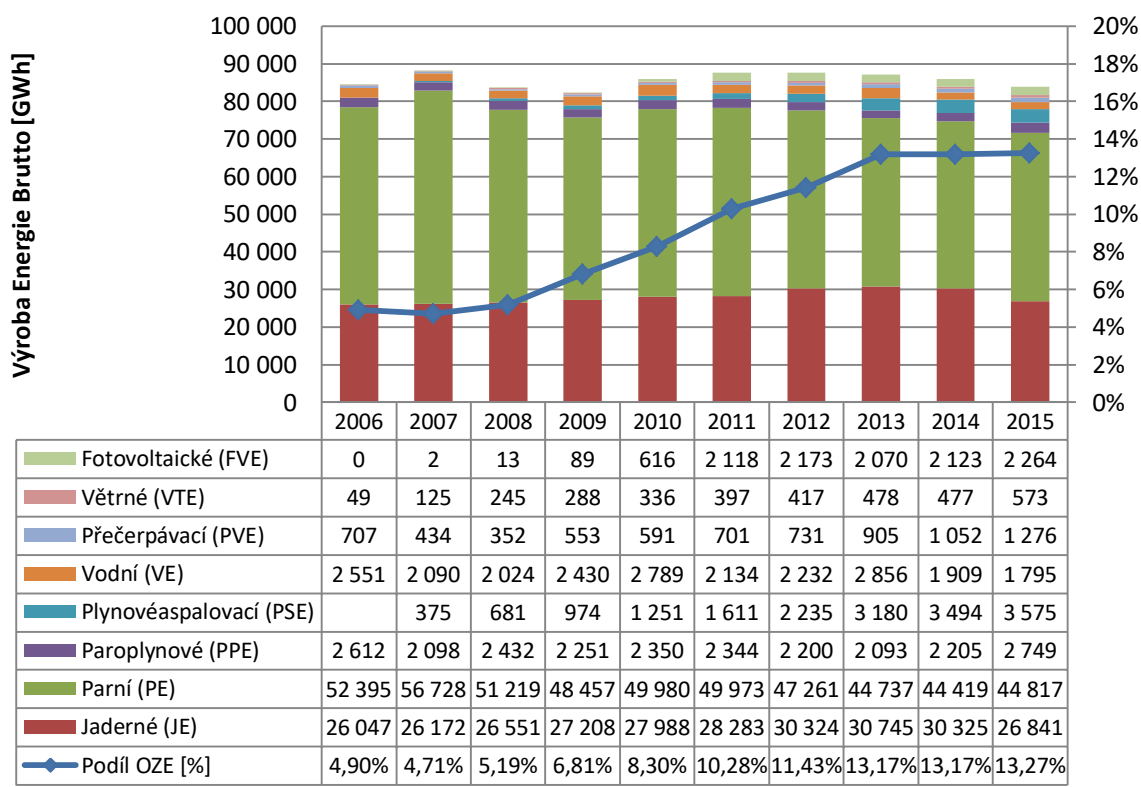


Obrázek 1: Vývoj instalovaného výkonu v ČR k 31. 12. 2015⁶

Obrázek 2 ukazuje vývoj brutto výroby elektřiny z jednotlivých typů zdrojů energie mezi lety 2006 až 2015 a zároveň procentuální podíl OZE na celkové výrobě elektřiny v České republice.

⁶ ERÚ: Energetický regulační úřad. Roční zpráva o provozu ES ČR: 2015 [online]. Praha, 2016

Vývoj výroby elektřiny brutto v ČR dle zdrojů



Obrázek 2: Vývoj výroby elektřiny brutto v ČR dle zdrojů⁷

Z těchto hodnot je vidět, že ačkoliv podíl FVE na celkovém instalovaném výkonu v ČR je zhruba 9,5 %, na výrobě elektrické energie se podílejí pouze 2,7 %. Veškeré obnovitelné zdroje energie se podílely v roce 2015 na výrobě elektřiny z 13,27 %.

I přes zásoby hnědého uhlí není naše republika energeticky soběstačná a je závislá na dovozu energetických surovin od jiných světových velmocí. Právě nezávislost na dodávkách surovin je dalším z impulsů pro rozvoj obnovitelných zdrojů energie. [22]

2.1.2 Fotovoltaické elektrárny v ČR

Na seznamu českých fotovoltaických elektráren s největším instalovaným výkonem, který ukazuje Tabulka 2, je vidět, že valná většina jich vznikla až po roce 2009. Toto období se nazývá „Solární boom“. Jeho příčinou bylo jednak nevhodné nastavení dotační politiky (viz kapitola 2.4.1) a jednak pokles cen fotovoltaických článků a modulů. [24]

⁷ ERÚ: Energetický regulační úřad. Roční zpráva o provozu ES ČR: 2015 [online]. Praha, 2016

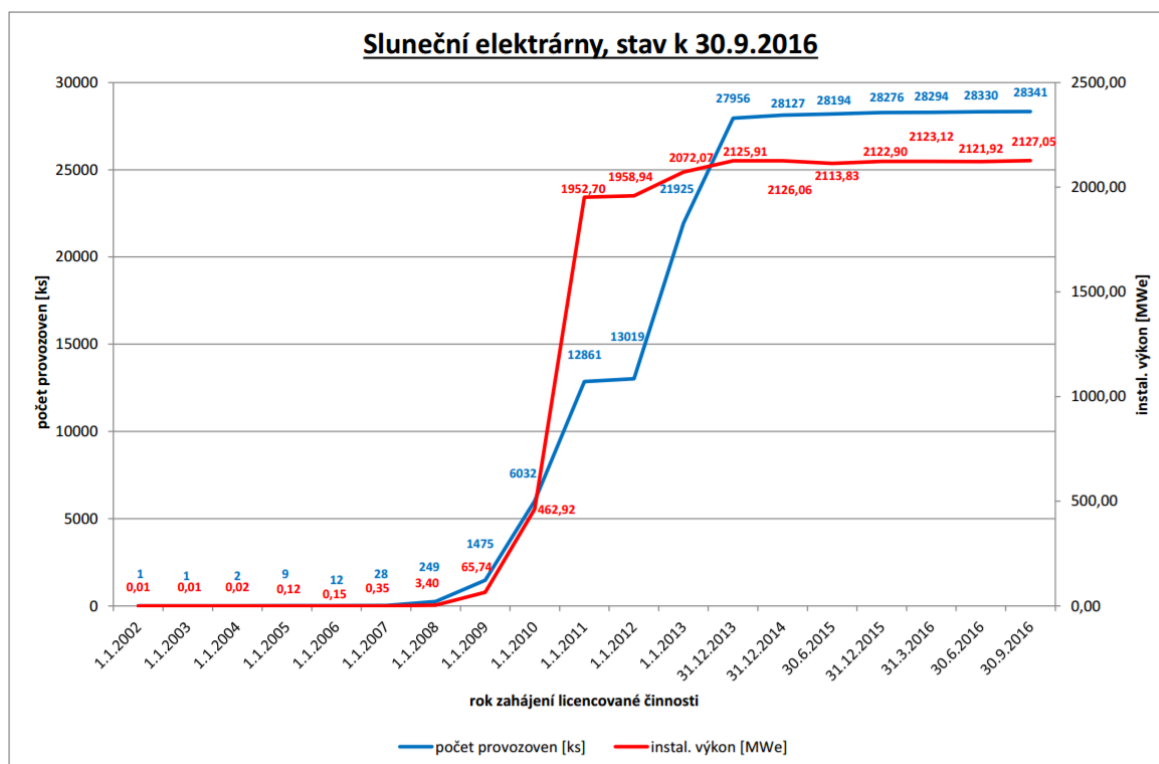
Název	Místo	Instalovaný výkon [MW]	Spuštění	Roční výroba elektřiny v roce 2011 [GWh]	Provozovatel
FVE Ralsko Ra 1	Ralsko	38,3	2010	40	ČEZ Obnovitelné zdroje, s.r.o.
FVE Vepřek	Nová Ves-Vepřek	35,1	2010	40,4	FVE CZECH NOVUM s.r.o.
FVE Ševětín	Ševětín	29,9	2010	32,5	ČEZ Obnovitelné zdroje, s.r.o.
FVE Brno - Letiště Tuřany	Brno	21,2	2009, 2010	18	BS Park I. s.r.o. BS Park II. s.r.o. BS Park III. s.r.o.
FVE Mimoň Ra 3	Mimoň	17,5	2010	17,6	ČEZ Obnovitelné zdroje, s.r.o.
FVE Vranovská Ves	Vranovská Ves	16	2010	18,4	ČEZ Obnovitelné zdroje, s.r.o.
FVE Stříbro	Stříbro	13,6	12/2009	15,6	Solar Stříbro s.r.o.
FVE ŽV-SUN	Chomutov	13	2010	13,1	ŽV - SUN, s. r. o.
FVE Uherský Brod	Uherský Brod	10,21	2010	12,3	Divalia a.s.
FVE Chrudichromy	Chrudichromy	10,00	2010		Photon Park, s.r.o. Photon Forest, s.r.o.

Tabulka 2: Seznam největších fotovoltaických elektráren v ČR^{8,9}

Obrázek 3 zobrazuje vývoj celkového počtu instalovaných FVE na území ČR. Strmý nárůst počtu, stejně jako celkového instalovaného výkonu, je vidět mezi lety 2009 až 2011. Tabulka 3 dělí FVE elektrárny do kategorií dle instalovaného výkonu a zobrazuje jednotlivé výrobní podíly těchto kategorií. V tabulce je vidět, že kategorie do 10 kW a 10 až 30 kW mají nejnižší procentuální podíl dodávky elektřiny do ES z netto výroby. To znamená, že se jedná zejména o střešní instalace, kde je snaha energii spotřebovat přímo v místě výroby. Naopak u elektráren s instalovaným výkonem nad 1 MW je tento podíl téměř 100 %.

⁸ Wikipedia: the free encyclopedia *Seznam největších fotovoltaických elektráren v Česku*.

⁹ ERÚ. *Přehled údajů o licencích udělených ERÚ* [online]. Praha, 2016



Obrázek 3: Vývoj počtu slunečních elektráren v ČR¹⁰

	Celkový instalovaný výkon	Výroba elektřiny brutto	TVS _e ¹¹	Výroba elektřiny netto	Dodávka elektřiny do ES
	[MWe]	[MWh]	[MWh]	[MWh]	[MWh]
FVE celkem	2 075	2 263 846	19 651	2 244 195	2 096 913
do 10 kW včetně	95	96 329	28	96 301	63 646
nad 10 do 30 kW včetně	149	148 550	89	148 461	92 306
nad 30 kW do 100 kW včetně	52	52 808	109	52 700	42 105
nad 100 kW do 1 MW včetně	450	488 748	4 013	484 735	453 324
nad 1 do 5 MW včetně	990	1 102 264	8 020	1 094 244	1 082 974
nad 5 MW	339	375 147	7 393	367 754	362 558

Tabulka 3: Výkonové a výrobní podíly kategorií FVE v ČR v roce 2015¹²

Zajímavostí také je, že, dle materiálů vydaných společností ČEPS a.s., jsou veškeré fotovoltaické a větrné elektrárny připojené do distribuční soustavy a žádná není připojena přímo do přenosové soustavy. O podmínkách připojení do distribuční soustavy a přenosové soustavy pojednává kapitola 3.13. [8]

2.2 Obnovitelné zdroje energie ve světě

Se vzrůstající vyspělostí lidstva a s rostoucí populací roste i poptávka po energii. Lidstvo v roce 2000 spotřebovalo zhruba 295 000 PJ energie, v roce 2014 to bylo už 395 000 PJ. To je nárůst zhruba o jednu třetinu za 14 let.[38] Většina této energie pochází z fosilních

¹⁰ ERÚ: Energetický regulační úřad. *Sluneční elektrárny: stav k 30.9.2016* [online]. Praha, 2016

¹¹ Technologická vlastní spotřeba

¹² ERÚ: Energetický regulační úřad. *Roční zpráva o provozu ES ČR: 2015* [online]. Praha, 2016

paliv, jejichž zásoby se tenčí. Odhady hovoří o dostatečných zásobách fosilních paliv na několik desetiletí nebo staletí.[6] Vyčerpání zásob se naší generace tedy už týkat pravděpodobně nebude, ale mohlo by se týkat generací následujících. Stejně tak se očekává, že i problematika globálního oteplování se bude týkat až našich potomků. Tyto problémy nás tedy v současnosti tolik neovlivňují, ale my můžeme ovlivnit je. Není jisté, zda je hlavní příčinou globálního oteplování člověk, ale je jisté, že do ovzduší vypouštíme více oxidu uhličitého než kdy předtím.[28] Mohou se objevit nové zásoby fosilních paliv nebo vymyslet nové technologie, které dovolí těžít i dnes zatím netěžitelné zásoby. Nelze na to ale spoléhat. Svět si pomalu uvědomuje potřebu změny a snaží se přeorientovat svoji energetiku na obnovitelné zdroje, produkující minimum oxidu uhličitého. V roce 2000 byl celosvětový instalovaný výkon z OZE zhruba 850 GW. V roce 2015 je to již téměř 2 000 GW.

Největší instalovaný výkon z OZE nalezneme v Asii, kde je instalováno přibližně 780 GW. V Evropě je instalováno zhruba 490 GW a v Severní Americe 325 GW. [40]

2.2.1 Fotovoltaické elektrárny ve světě

Fotovoltaické elektrárny zažívají v posledních letech ve světě velký rozmach. Tabulka 4 ukazuje země s největším instalovaným výkonem fotovoltaických elektráren v roce 2015. Česká republika je se svými 2 GW na 15. místě. V dnešní době už vznikají projekty na solární parky s výkonem nad 500 MW. Zejména v Číně, Indii a Americe. V Evropě byla největší fotovoltaická elektrárna připojena do sítě na konci roku 2015. Jedná se o elektrárnu Cestas ve Francii, poblíž města Bordeaux s instalovaným výkonem 300 MW. [39]

Země	Instalovaný výkon [MW]
Čína	43 194
Německo	39 636
Japonsko	33 300
USA	23 955
Itálie	18 916
Velká Británie	8 915
Španělsko	7 132
Francie	6 549
Indie	5 167
Austrálie	5 034

Tabulka 4: Státy s největším instalovaným výkonem FVE na světě v roce 2015¹³

2.3 Role OZE v energetice ČR

Česká Republika se nachází v mírném podnebném pásu a mísí se zde oceánský a kontinentální typ klimatu. Horská území nalezneme převážně v pohraničních oblastech a nežrádka jsou tyto oblasti chráněné. Pokud si rozebereme jednotlivé druhy obnovitelných zdrojů energie a jejich využití na našem území, zjistíme, že nemá naše země pro tyto zdroje vhodné předpoklady. Roční doba slunečního svitu se v České republice pohybuje

¹³ IRENA: International Renewable Energy Agency. *Featured Dashboard - Capacity and Generation: World Overview* [online]. Masdar City, 2016

mezi 1200 a 1700 hodin.[79] Průměrná hodnota dopadajícího sluneční energie na kolmý povrch je zhruba 2,85 kWh/m²/den.[51] Oblastí se stálým prouděním větru je velmi málo. Nacházejí se v horských oblastech a nezářka v horských průsmycích, kde si však stavbu elektrárny z ekologického hlediska lze jen těžko představit. Vodní toky, se z vodohospodářského hlediska dělí do takzvaných povodí. V České republice jsou určeni správci povodí. Jedná se o státní podniky a spravují povodí Vltavy, Labe, Ohře, Odry a Moravy. O malé vodní toky se stará státní podnik Lesy České Republiky. K energetickým účelům jsou využívány pouze některé toky a vždy se jedná o dohodu mezi energetickou firmou a správcem povodí. Nejznámějším souborem vodních děl na našem území je bezesporu vltavská kaskáda. Dlouhou dobu byly vodní elektrárny jediným významným zástupcem obnovitelných zdrojů v našem energetickém mixu. V dnešních dnech s dalším razantním rozšířením instalovaného výkonu ve vodních zdrojích však počítat nelze. Potenciál rozšíření objemu výroby energie můžeme najít v biomase. Za biomasu se považují veškeré plodiny rostlinného původu, využitelné k výrobě energie. Známým zástupcem bývají rychle rostoucí dřeviny, případně odpady z potravinářského, zemědělského nebo např. dřevozpracujícího průmyslu. Z ekonomického hlediska je bohužel mnoho těchto projektů týkajících se OZE bez státní pomoci nerentabilních. [16] [23]

V současné době a se současnými technologiemi, kdy stále chybí účinný a ekonomický způsob uchování velkého množství elektrické energie, mohou obnovitelné zdroje energie sloužit pouze společně s klasickými zdroji energie, u kterých se dá výroba řídit. [22]

2.4 Legislativa fotovoltaických elektráren v České republice

Rozvoj využívání OZE a omezení používání fosilních paliv jsou cíle jak Evropské unie, tak České republiky. Hlavním orgánem ve tvorbě legislativního prostředí je vláda. Problematikou obnovitelných zdrojů se zabývají hlavně ministerstva průmyslu a obchodu, životního prostředí, financí a ministerstvo pro místní rozvoj. Z dalších orgánů, které se podílejí významným dílem na tvorbě prostředí pro fotovoltaické elektrárny, můžeme jmenovat Energetický regulační úřad (ERÚ) a OTE, a.s. Nejdůležitější zákony, které upravují legislativní rámec obnovitelných zdrojů energie, jsou:

- **Zákon č. 458/2000 Sb.**, o podmínkách podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích a o změně některých zákonů (energetický zákon).¹⁴ Zákon upravuje podmínky podnikání, výkon státní správy a regulaci v energetických odvětvích, kterými jsou elektroenergetika, plynárenství a teplárenství, jakož i práva a povinnosti fyzických a právnických osob s tím spojené.[94]
- **Zákon č. 180/2005 Sb.**, o podpoře výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů.¹⁵ Upravuje způsob podpory výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů energie a výkon státní správy a práva a povinnosti fyzických a právnických osob s tím spojené. Tento zákon byl platný do 31. 12. 2012. [91]

¹⁴ Zákon č. 458/2000 Sb., o podmínkách podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích a o změně některých zákonů (energetický zákon). In: *Sbírka zákonů*. Praha, 2000, ročník 2000, 131 a násl.

¹⁵ Zákon č. 180/2005 Sb., o podpoře výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů energie a o změně některých zákonů (zákon o podpoře využívání obnovitelných zdrojů). In: *Sbírka zákonů*. Praha, 2005, ročník 2005, 66 a násl.

- **Zákon č. 165/2012 Sb.**, o podporovaných zdrojích energie a o změně některých zákonů, ve znění zákona č. 90/2014 Sb.¹⁶ Tento zákon nahradil zákon 180/2015, zapracovává příslušné předpisy Evropské unie a upravuje podmínky podpory elektřiny a tepla z obnovitelných zdrojů a podporuje ochranu klimatu a ochranu životního prostředí. [90]

Každý rok jsou poté pravidelně vydávány ERÚ cenová rozhodnutí, stanovující výši podpory pro jednotlivé typy OZE. ERÚ také na základě platných zákonů vydává licence pro připojení FVE do elektrizační soustavy. [31]

Při výstavbě nových zdrojů je potřeba důkladně znát současný legislativní rámec a snažit se odhadnout vývoj do budoucna. Časté změny a úpravy v legislativě však bohužel vytvářejí nedůvěryhodné a nestabilní prostředí, ve kterém je riskantní investovat do dlouhodobých projektů, kterými energetické projekty zajisté jsou.

2.4.1 Dotační programy v České republice

První podpora fotovoltaických elektráren v České republice byla zakotvena zákonem č. 180/2005 Sb., který vychází ze směrnice 2001/77/ES Evropského parlamentu a Rady¹⁷. Tento zákon stanovil garantované výkupní ceny a také výši zeleného bonusu. V tomto zákoně byla také stanovena maximálně 5% meziroční změna těchto cen, takzvaná „pětiprocentní brzda“. Dnes je již tento zákon neplatný a nahradil ho zákon 165/2012 Sb.¹⁶. Výkupní cenou se rozumí cena, za kterou povinně vykupující vykoupí veškerý objem elektřiny dodané do sítě, naměřený v předávacím místě výroby elektrické energie a distribuční soustavy. Zelený bonus se pak týká veškeré energie vyrobené z OZE, která je účelně spotřebovaná, včetně spotřeby na místě, s výjimkou technologické vlastní spotřeby. Výrobce sám prodává elektřinu na trhu a k prodejní ceně dostává navíc tento bonus, který je vyplácen OTE a.s. [29]

Následující Tabulka 5 ukazuje platné výkupní ceny a zelené bonusy pro rok 2016, které jsou stanoveny cenovým rozhodnutím ERÚ z 5/2016.

¹⁶ Zákon č. 165/2012 Sb. o podporovaných zdrojích energie a o změně některých zákonů. In: *Sbírka zákonů*. 2012, ročník 2012, 59 a násl.

¹⁷ SMĚRNICE EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY 2001/77/ES ze dne 27. září 2001 o podpoře elektřiny vyrobené z obnovitelných zdrojů energie na vnitřním trhu s elektřinou. In: *Úřední věstník Evropské unie*. 2011, ročník 2001.

	Datum uvedení výroby do provozu		Instalovaný výkon výroby [kW]		Jednotarifní pásmo provozování	
	od (včetně)	do (včetně)	od	do (včetně)	Výkupní ceny [Kč/MWh]	Zelené bonusy [Kč/MWh]
Výroba elektřiny využitím slunečního záření	-	31. 12. 2005	-	-	7 717	7 067
	1. 1. 2006	31. 12. 2007	-	-	16 194	15 544
	1. 1. 2008	31. 12. 2008	-	-	15 794	15 144
	1. 1. 2009	31. 12. 2009	0	30	14 819	14 119
	1. 1. 2009	31. 12. 2009	30	-	14 710	14 060
	1. 1. 2010	31. 12. 2010	0	30	13 801	13 101
	1. 1. 2010	31. 12. 2010	30	-	13 692	13 042
	1. 1. 2011	31. 12. 2011	0	30	8 280	7 580
	1. 1. 2011	31. 12. 2011	30	100	6 517	5 867
	1. 1. 2011	31. 12. 2011	100	-	6 073	5 423
	1. 1. 2012	31. 12. 2012	0	30	6 669	5 969
	1. 1. 2013	30. 6. 2013	0	5	3 691	2 991
	1. 1. 2013	30. 6. 2013	5	30	3 064	2 364
	1. 7. 2013	31. 12. 2013	0	5	3 236	2 536
	1. 7. 2013	31. 12. 2013	5	30	2 632	1 932

Tabulka 5: Platné garantované výkupní ceny a zelené bonusy pro rok 2016¹⁸

Jak je vidět, elektrárny s instalovaným výkonem nad 30 kWp uvedené do provozu po 1. 1. 2012 již nejsou dotovány. Program garantovaných výkupních cen a zelených bonusů skončil pro všechny nově postavené elektrárny bez rozdílu instalovaného výkonu k 31. 12. 2013. [30]

Od 22. 10. 2015 se zavedl nový program, který se jmenuje Nová zelená úsporám. Jedná se o program Ministerstva životního prostředí, administrovaný Státním fondem životního prostředí ČR. Tento program se však týká zejména výstavby FVE pro rodinné a bytové domy a poskytuje podporu pouze na výstavbu, která může činit až 100 000 Kč. Na systémy vyrábějící elektřinu je možné o tuto podporu zažádat jen pro instalace s nižším výkonem než 10 kWp. [52]

2.4.2 Certifikáty a normy pro fotovoltaické panely

Aby mohly být fotovoltaické panely uvedeny na evropský trh, je nutné s nimi dodat potřebné certifikáty. Povinným dokumentem je prohlášení o shodě. Tímto dokumentem výrobce deklaruje, že u jeho výrobku správně posoudil shodu s požadavky příslušných nařízení vlády. Na výrobku také musí být umístěna značka CE. [35]

S rostoucím zájmem o fotovoltaiku a snižující se cenou fotovoltaických panelů se zákonitě rozšiřuje i nabídka komponentů fotovoltaických systémů. V této nabídce se nacházejí i asijské výrobky a je nutné pro investora zjistit, zdali tyto výrobky splňují evropské technické normy. Česká republika má povinnost tyto normy převzít do svých národních norem. Mezi nejdůležitější české normy patří:

¹⁸ ERÚ: Energetický regulační úřad. *Platná cenová rozhodnutí: Podporované zdroje energie* [online]. Praha, 2016

- ČSN CLC/TS 61836 - Solární fotovoltaické energetické systémy - Termíny, definice a značky [18]
- ČSN EN 60891 ED.2 - Fotovoltaické součástky - Postupy pro korekce teploty a ozařování na změřených voltampérových charakteristikách [19]
- ČSN EN 60904 díl 1 – 10 - Fotovoltaické součástky. Část 1-10 [20]
- ČSN EN 61853-1 - Zkoušení výkonu a jmenovitých údajů energie fotovoltaického (PV) modulu - Část 1: Měření výkonnosti ozařování a teploty a jmenovité údaje výkonu [21]

Seznam norem týkajících se FVE se dá najít na stránkách Úřadu pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví (ÚNMZ). Tyto normy nejsou závazné, ale slouží jako referenční hodnoty pro výrobu, dávají výrobku dobré jméno a zaručují jeho bezpečnost, jakost, šetrnost k životnímu prostředí a technickou úroveň.[83]

2.4.3 Státní energetická koncepce

Energetika je odvětví, které má velkou setrvačnost a není schopné pružně reagovat na rychle se měnící společenské a politické trendy. Je však bezpodmínečně nutné, aby politická rozhodnutí neohrožovala bezpečnost a stabilitu energetické soustavy ani dnes, ani v budoucnosti. Proto byla vytvořena Státní energetická koncepce (SEK), dokument určující budoucí směřování energetiky v českých zemích na desítky let dopředu. Tento dokument zpracovává Ministerstvo průmyslu a obchodu a je schvalován vládou. První SEK byla schválena 10. 3. 2003 a určovala směřování české energetiky na 30 let dopředu. Hlavním cílem tohoto dokumentu je zajistit ochranu životního prostředí, zajistit stálou, spolehlivou a bezpečnou dodávku elektrické energie za konkurenceschopné ceny, vytvořit předvídatelné a stabilní podnikatelské prostředí a to vše k uspokojení potřeb obyvatelstva a ekonomiky České republiky. Státní energetická koncepce bývá vyhodnocována každých 5 let a poté případně aktualizována. SEK musí brát v potaz dynamické a turbulentní změny ve společnosti a technický vývoj. Poslední platná aktualizace státní energetické koncepce byla schválena dne 18. května 2015 a stanovuje cíle do roku 2040. Vrcholovými cíli této aktualizace jsou bezpečnost, konkurenceschopnost a udržitelnost. [49]

V České republice došlo od roku 2002 k postupné liberalizaci trhu s elektřinou. Do té doby byla energetika v českých zemích centrálně řízena a výrobní podniky držely přirozený monopol. Hlavním smyslem liberalizace bylo vytvoření tržního prostředí a umožnění vstupu nových subjektů na trh. Do takového prostředí by však vláda měla co nejméně zasahovat, neboť jakýmkoliv zásahem dochází k deformaci trhu. Cíle stanovené ve SEK mohou být dosahovány pouze pomocí vládních nástrojů, jako jsou dotace, granty, daně, sankce a jiné. Nemohou být přímo nařizovány nebo vymáhány.[25]

2.5 FVE jako nástroj decentralizace a Smart grid

Centralizovaná výroba energie znamená, jestliže se na výrobě energie podílí pouze několik málo zdrojů velkého výkonu. Často se stává, že místa výroby jsou odlišná od místa spotřeby a je tedy nutné vybudovat mohutnou a stabilní přenosovou soustavu, která bude schopná přenášet dostatečné výkony. Tyto velké výrobní jednotky vyžadují nemalé investice, což znamená, že na trhu je pouze několik málo subjektů.

Decentralizace je naopak založená na úplně opačných principech. Decentralizovanou výrobou elektřiny se myslí výroba elektřiny v malém množství a v mnoha jednotkách. K těmto účelům jsou fotovoltaické panely ideální. Jsou schopny, bez velkého vlivu na účinnost, fungovat jak v malých systémech čítající několik panelů, tak i v rozlehlých fotovoltaických elektrárnách o počtu tisíců panelů. Decentralizací je možné přiblížit místa výroby místům spotřeby. Touto cestou by se menší subjekty, jako například jednotlivci, firmy, vesnice, obce nebo města mohly stát investory a být tak zapojeni více do dění v energetice. Mezi výhody decentralizace také patří menší zatěžování přenosových linek a převzetí zodpovědnosti a rozhodování lokálními subjekty. Při výpadku jednoho zdroje není marginálně ovlivněna kvalita elektrické energie v síti. Mezi nevýhody tohoto řešení patří zatím stále vyšší cena za jednotku vyrobené energie než v elektrárnách velkých výkonů. Dále je pak potřeba počítat s modernizací distribuční sítě, zejména co se měřících a bezpečnostních prvků týče, případně i s výstavbou nových vedení.[44][84][75]

Smart grid, v češtině inteligentní síť, jsou silové a komunikační sítě, které v reálném čase dokáží řídit výrobu a spotřebu elektrické energie. Tato síť je založena na vzájemné obousměrné komunikaci mezi výrobcí a spotřebiteli. Inteligentní elektroměry v domácnostech poté dokážou na základě současného stavu sítě rozhodnout, kdy je výhodné připojit akumulární spotřebiče, například pro ohřev vody nebo pro nabíjení baterií. Rozvoj inteligentních sítí začal s rozvojem instalace OZE, neboť u většiny z nich je těžké predikovat výrobu. Fungující inteligentní síť dokáže za určitých podmínek z velké části regulovat přebytky nebo nedostatky elektrické energie již na lokálním měřítku. Pilotní projekt v České republice byl spuštěn roku 2010 společností ČEZ, a.s. v mikroregionu Vrchlabí. [1][14]

3 Popis a specifiky jednotlivých komponent fotovoltaické elektrárny včetně zařízení k připojení elektrárny do distribuční soustavy vn

V této kapitole budou popsány jednotlivé technologie a vlastnosti komponentů fotovoltaických systémů. O každém z nich již bylo napsáno mnoho publikací a detailní popisování by mnohonásobně překročilo rozsah této práce. Pozornost bude tedy věnována pouze vlastnostem, které jsou důležité pro vytvoření matematického a ekonomického modelu.

3.1 Významné milníky v solární energetice

Člověk využívá sluneční energii a její projevy na Zemi už od nepaměti. Světlem a jeho účinkem se zabývalo na přelomu 19. a 20. století mnoho fyziků. Můžeme jmenovat například Alexandra Edmonda Becquerela, Maxe Plancka nebo Heindricha Hertze. Avšak až po objasnění fotoelektrického jevu Albertem Einsteinem, za což dostal roku 1921 Nobelovu cenu, byly položeny základy zcela nového technického oboru. V roce 1940 objevil Russel Shoemaker Ohl, že křemíková destička, která obsahuje přechod mezi dotovanou vrstvou typu P a dotovanou vrstvou typu N (PN přechod), při osvětlení vyrábí proud. Tento svůj objev si nechal patentovat. První fotovoltaický článek určený pro výrobu elektřiny byl vyroben roku 1954 v Bellových laboratořích.[2] První využití fotovoltaických panelů je spjata s vesmírnými misemi, kde jimi byly osazovány vesmírné družice. Zpočátku byla výroba těchto článků vysoce nákladná a účinnost nízká, zhruba 8-10 %. Postupem času vznikaly nové typy fotovoltaických článků, ale křemík zůstává do dnešních dnů nejvýznamnějším materiálem pro jejich výrobu. První vlna zájmu o fotovoltaické panely proběhla v 70. letech a je spjata s ropnými krizemi. Tento zájem nastartoval výzkum a vývoj, který má za následek snižování cen fotovoltaických panelů a zvyšování jejich účinnosti. [80]

Pravý boom výroby solárních panelů můžeme zaznamenat až zhruba v devadesátých letech a to díky dotační politice některých zemí. Jednou z prvních zemí, která začala podporovat výstavbu fotovoltaických systémů, bylo Japonsko. To svůj program začalo roku 1994. V Evropě je průkopníkem v podpoře obnovitelných zdrojů Německo.[4]

Významným impulsem pro rozvoj využívání obnovitelných zdrojů je prosinec 1997, kdy byl přijat Kjótský protokol k Rámcové úmluvě OSN o změně klimatu¹⁹. V tomto protokolu se zúčastněné země zavázaly snížit produkci skleníkových plynů v prvním kontrolním období (2008-2012) minimálně o 5,2 % ve srovnání se stavem roku 1990. V těchto letech vyspělé a rozvojové země začínají plně vnímat hrozbu klimatických změn a hledají řešení situace. Solární panely byly jednou z možností, jak tuto produkci snížit. Začalo se tedy hojně investovat jak do výzkumu, tak i do výstavby. [82]

¹⁹ United Nations: *Kjótský protokol k Rámcové úmluvě OSN o změně klimatu*. In.: Kyoto: OSN, 1997. Dostupné také z: [http://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/kjotsky_protokol/\\$FILE/OMV-cesky_protokol-20081120.pdf](http://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/kjotsky_protokol/$FILE/OMV-cesky_protokol-20081120.pdf)

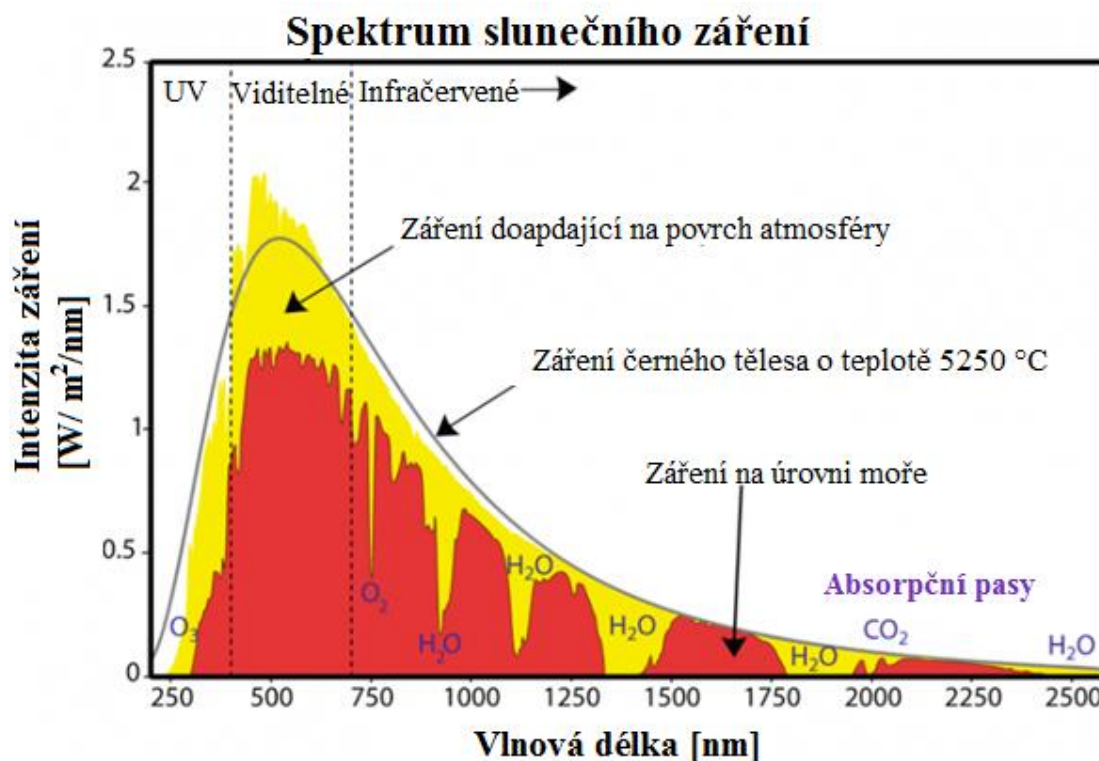
Dalším významným milníkem pro evropské země lze brát rok 2011, kdy došlo k havárii v japonské jaderné elektrárně Fukušima. Německo již před tímto incidentem výrazným způsobem podporovalo obnovitelné zdroje. Tato havárie měla za následek ztrátu důvěry německých občanů v jaderné technologie a urychlení změny energetické politiky Spolkové republiky Německa. Tato změna bývá nazývána „Energiewende“ a jejím hlavním cílem je přechod od fosilních paliv k obnovitelným zdrojům energie. Cílem politiky Energiewende je do roku 2022 opustit úplně výrobu elektrické energie z jaderných elektráren a do roku 2050 dosáhnout 60% podílu výroby energie z OZE. Dále pak snížení spotřeby primární energie, snížení produkce skleníkových plynů a další. Tato změna politiky se samozřejmě z velké míry týká i naší země, neboť Německo je náš sousední stát, se kterým máme propojenou energetickou soustavu a také je jedním z významných obchodních partnerů České republiky. Německo bylo, jakožto jeden z nejdůležitějších a ekonomicky nejsilnějších členů Evropské unie, následováno i některými dalšími zeměmi. Energetická politika se stala velmi žhavým tématem jak na půdě Evropského parlamentu, tak v jednotlivých evropských zemích.[53][27]

3.2 Slunce jako zdroj energie na Zemi

Slunce, jako naše nejbližší hvězda, je naším nejdůležitějším zdrojem energie a díky němu je umožněn život na planetě. Slouží jako střed naší sluneční soustavy, kde po eliptických drahách, obíhají veškeré planety a objekty v naší sluneční soustavě. Slunce leží právě v jednom z ohnisek těchto eliptických drah. Pro život na Zemi je však nejdůležitějším faktem to, že Slunce je náš hlavní zdroj světla a tepla. Veškerá energie na Zemi má svůj původ ve slunečním záření nebo z jaderných reakcí probíhajících v zemském jádře. Využívání energie z jaderných reakcí člověkem začalo relativně nedávno. Projevem jaderných reakcí v zemském jádře je energie geotermální, která využívá vzniklé tepelné energie v jádru země. Nejznámějším využitím v současné době jsou však bezesporu jaderné reaktory. Jejich využití začíná až v 50. letech 20. století. V těchto reaktorech se využívá jaderného štěpení těžkých jader, při kterém je uvolněno velké množství energie. Opačný postup neboli syntéza lehkých jader, se nazývá jaderná fúze. Ta však v dnešních dnech stále nemá komerční využití a její zvládnutí, navzdory pokrokům v dlouholetých výzkumech, bude vyžadovat ještě mnoho let, pokud se vůbec někdy podaří. [85][76]

Energie ze Slunce má na Zemi mnoho projevů a často je transformována do jiného druhu energie. Např. při ohřevu vodních ploch dochází k výparu vody, ta se potom koncentruje v atmosféře a vytváří mraky. Ty jsou následně pomocí pohybu vzdušných mas přeneseny nad pevninu, kde ve formě srážek kondenzují. Tak je zajištěn koloběh vody, ve kterém jsme schopni využívat její energii. Nebo energie větru - vzniká nerovnoměrným ohřevem zemského povrchu. Následkem toho vzniká tlakový rozdíl vzduchu a jeho vyrovnávání způsobuje proudění větru. Také rostliny potřebují ke svému růstu světelnou a tepelnou energii. Tato energie je pomocí organických procesů v rostlině přeměněna a akumulována. Energie může být následně uvolněna například hořením nebo rozkladem. I energie fosilních paliv není ve skutečnosti nic jiného než energie biomasy, která pochází z pradávných dob a byla změněna za nepřítomnosti vzduchu. Slapové jevy, využívané též k výrobě elektrické energie ve slapových elektrárnách, jsou zapříčiněny interakcí gravitačních polí Země, Slunce a Měsíce. [22]

Pro celkové pochopení je dobré vysvětlit, kde se veškerá tato energie bere. V jádře Slunce probíhají termonukleární reakce, při kterých se uvolňuje značné množství energie. To je poté vyzařováno do okolního prostoru. Na Zemi dopadá pouze malá část této energie. Jak je velká se dá snadno spočítat. Obrázek 4 zobrazuje spektrum slunečního záření. Na jeho základě bylo zjištěno, že Slunce vyzařuje maximální množství energie v blízkosti vlnové délky $\lambda_{max} = 550 \text{ nm}$.



Obrázek 4: Spektrum slunečního záření²⁰

Pokud budeme záření povrchu Slunce považovat za záření absolutně černého tělesa, tak dle Wienova posunovacího zákona:

$$T \times \lambda_{max} = b \text{ [mm} \times \text{K]} \quad (1)$$

kde b je Wienova konstanta, vychází, že povrch Slunce má teplotu $T_{sl} = 5800 \text{ K}$. Pokud se tato teplota dosadí do Stefanova-Boltzmannova zákona, kde σ je Stefanova-Boltzmannova konstanta, získáme intenzitu záření povrchu absolutně černého tělesa:

$$M_e = \sigma \times T_{sl}^4 = 6,42 \times 10^7 \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (2)$$

Poté se znalostí základních astronomických hodnot r_s poloměr slunce, r_z poloměr země, R_{sz} střeni vzdálenost Země-Slunce získáme nejdříve celkový vyzařovaný výkon Slunce:

$$P_s = M_e \times 4\pi r_s^2 = 3,91 \times 10^{26} \text{ [W]} \quad (3)$$

²⁰ The Pennsylvania State University: The College of Earth and Mineral Sciences. *Spectre of Solar Radiation* [online]. Pennsylvania, 2015

Tento výkon je vyzařován rovnoměrně do celého okolí. Na Zemi dopadá pouze malá část tohoto záření. V mezihvězdném prostoru přenosu energie nic nebrání a tudíž se znalostí vzdálenosti Země – Slunce lze počítat energii dopadající na průmět zeměkoule:

$$\Delta P_s = \frac{\pi r_z^2}{4\pi R_{sz}^2} * P_s = 1,79 * 10^{17} [W] \quad (4)$$

Na jeden metr čtvereční povrchu atmosféry dopadá:

$$I_{sl} = \frac{\Delta P_s}{\pi r_z^2} = 1367 \left[\frac{W}{m^2}\right] \quad (5)$$

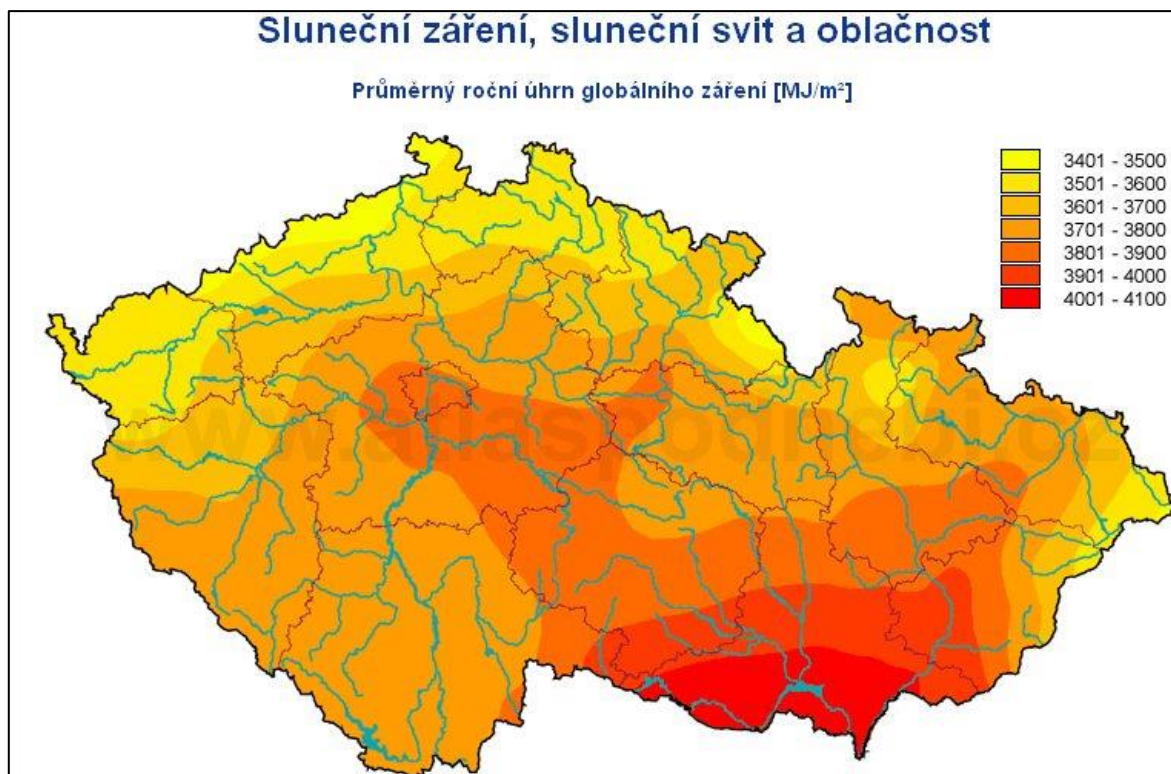
Tato hodnota je nazývána sluneční konstanta a v průběhu roku se mění pouze minimálně. Při průchodu atmosférou je část záření odražena zpět, pohlcena nebo rozptýlena. Na zemský povrch dopadá v průměru kolem 1000 W/m². Tato hodnota závisí na několika faktorech. Jedná se zejména o zeměpisnou polohu, roční období, aktuální klimatické podmínky a také o fázi dne. Tyto faktory mají vliv na aktuální polohu slunce na obloze a na průchodnost atmosféry. Pokud známe aktuální polohu, můžeme určit takzvaný koeficient atmosférické masy - AM (anglicky Air Mass). Jedná se o bezrozměrnou veličinu, která udává násobek tloušťky atmosféry, kterou musí sluneční paprsky projít. Na povrchu atmosféry je tato hodnota logicky 0. Při kolmém dopadu paprsků na atmosféru je tato hodnota na povrchu země 1. Této hodnoty je možno dosáhnout pouze v okolí rovníku. Hodnota AM se dá počítat z následujícího vzorce

$$AM = \frac{1}{\sin \varphi} [-] \quad (6)$$

Kde φ je úhel mezi dopadajícími slunečními paprsky a horizontální rovinou. Významnou hodnotou je AM 1,5 což odpovídá úhlu 41°48'. [43]

Průchodnost atmosférou ovlivňují veškeré ,nečistoty', které se v atmosféře nacházejí. Jedná se zejména o částice prachu, vodní páry a další různé plynné částice nacházející se v atmosféře. Tyto látky pohlcují vždy pouze určité pasy vlnových délek. Jako příklad uveďme ozón (O₃), který se nachází v ozónové vrstvě a zabraňuje pronikání škodlivého UV záření na zemský povrch. Jednotlivé absorpční pasy ukazuje Obrázek 4. Sluneční záření se průchodem atmosférou poté dělí na několik frakcí. Na přímé sluneční záření, na rozptýlené, neboli difúzní, přicházející ze všech stran a na albedo, neboli záření, které bylo povrchem odraženo zpět. Z hlediska výroby elektrické energie z fotovoltaických panelů je nejdůležitější záření přímé. [47]

Při rozhodování o výstavbě solárních systémů není však maximální výkon dopadající na povrch tak významný. Daleko významnější je určení počtu slunečních hodin za rok a celková energie dopadající v dané lokalitě. Obrázek 5 zobrazuje izokřivky průměrných ročních úhrnů dopadajícího záření na jednotku plochy na území České republiky.



Obrázek 5: Izokřivky průměrné ho ročního úhrnu globální energie pro ČR²¹

Sluneční výkon dopadající na povrch atmosféry činí zhruba 180 000 TW. Celková spotřeba lidstva v roce 2014 byla 394 591 PJ²², což odpovídá energii, která dopadne na povrch naší atmosféry za zhruba 36 minut. Efektivní využití sluneční energie má tedy dostatečný potenciál na pokrytí energetických potřeb lidstva.

3.3 Možnosti využití solárního záření pro energetické účely

Nejznámějším způsobem využití sluneční energie je přímá přeměna na elektrickou energii ve fotovoltaických panelech. Jedná se o využití vnitřního fotoelektrického jevu při dopadu fotonu na křemíkovou destičku s PN přechodem. Tím se na destičkách vytváří napětí, a pokud je tento článek zapojen do obvodu, začne tímto obvodem protékat stejnosměrný proud. Účinnost takové přeměny se u dnešních systémů pohybuje řádově kolem 15 %. O principu fotovoltaických systémů a o jejich konstrukci bude detailněji pojednáno v kapitole 3.4.[41]

Další hojně využívanou variantou je přeměna sluneční energie na energii tepelnou. Nejčastěji je ohříváním médiem voda, ale je možné využívat i oleje. Principiálně se jedná o koncentraci slunečních paprsků na nádobu, případně na trubku, obsahující kapalinu. Znamé jsou střešní aplikace, které slouží pro ohřev vody pro domácnosti. V provozu jsou i větší systémy skládající se z mnoha dlouhých parabolických zrcadel, jejichž ohniskem prochází trubka s ohřívanou kapalinou. Získané teplo může být dále jakkoliv využito.

²¹ Solární energie. *Mapa slunečního záření* [online].

²² IEA: International Energy Agency. *Final Consumption 2014: World* [online]. Paříž, 2015

Jinou variantou těchto koncentrátorových zařízení jsou solární věže. Uprostřed rozlehlého pole plného zrcadel stojí věž. Všechny sluneční paprsky jsou pomocí pohyblivých zrcadel směřovány do její horní části, kde se nachází nádoba s kapalinou. Ta je ohřívána na vysoké teploty. Ty mohou dosáhnout až několika set stupňů celsia. Tímto ohřevem dochází k přeměně skupenství na páru a ta je využívána jako v běžných parních elektrárnách či teplárnách na fosilní paliva, avšak s nulovými emisemi CO₂. [43]

Sluneční koncentrátoři mohou také obsahovat Stirlingův tepelný motor. Tento motor je pístový a pracuje na principu teplotní roztažnosti plynu. Obvykle zde bývají dva válce, z nichž jeden je ohříván a druhý chlazen. Náplň pracovního plynu zůstává pořád stejná a střídavě se ohřívá a ochlazuje. Tento motor pracuje s vysokými účinnostmi, avšak má vysoké výrobní náklady a nižší výkon na jednotku hmotnosti oproti klasickým spalovacím motorům.[43] [73]

Problém veškerých slunečních koncentrátorů spočívá v tom, že parabolická zrcadla koncentrují pouze přímé sluneční záření. Jejich použití má tedy smysl pouze v místech, kde v průběhu roku převládá přímé sluneční záření. [47]

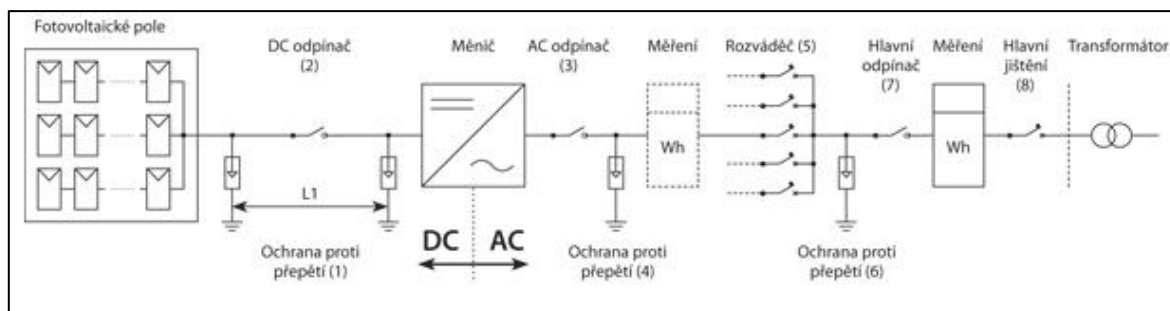
K výrobě elektrické energie se dá také využít termoelektrického jevu. Termočlánek se skládá z dvou rozdílných kovů, které jsou bodově svařené. Pokud je v termočlátku teplotní gradient, dochází k tzv. Seebeckovu jevu, kdy na svarech obou kovů je rozdílný elektrický potenciál a lze mezi nimi naměřit napětí. Tohoto se však v pozemských podmínkách nevyužívá. Své využití má však na vesmírných družicích na drahách vzdálených od Slunce. [43][26]

Toto nejsou jediná možná řešení využití solární energie, ale z energetického hlediska jsou nejvýznamnější a nejrozšířenější. Existuje mnoho zajímavých nápadů a prototypů na využívání solárního záření, které však zatím na svá případná uplatnění teprve čekají. Za zmínku určitě stojí takzvané solární komíny. V tomto případě se jedná o vysoký komín, který je obklopen kotoučem ze skla, jenž je umístěn několik metrů nad zemí. Vzduch pod tímto kotoučem je ohříván a díky komínovému efektu je unášen pryč. V komíně jsou poté instalovány turbíny, které jsou roztáčeny proudícím vzduchem a dochází k výrobě elektrické energie. Bohužel limitní jsou rozměry takového díla a také jeho účinnost. [69]

Společným problémem výše představených elektráren je potřeba vysoké intenzity slunečního záření, vysokého počtu slunečních dní a k získání dostatečného výkonu je zapotřebí obvykle i velké plochy. Z těchto faktorů vyplývá, že solární energie v našich geografických podmínkách nebude v nejbližších letech moci hrát hlavní roli a vždy bude potřeba dostatečný záložní výkon, který nahradí energii ze solárních panelů v případě nedostatku slunečního svitu. [22]

3.4 Schéma fotovoltaické elektrárny

Fotovoltaickou elektrárnou rozumíme systém, který slouží k přímé přeměně sluneční energie na energii elektrickou a k zajištění dodávek této energie do elektrizační soustavy. Obrázek 6 zobrazuje obecné schéma zapojení fotovoltaické elektrárny pracující do elektrizační soustavy. Jsou na něm vidět nejdůležitější komponenty, které tento systém obsahuje. V dalších kapitolách lze nalézt jejich detailnější popis.



Obrázek 6: Obecné schéma FV zdroje pracujícího paralelně s distribuční sítí²³

3.5 Fotovoltaické pole

Fotovoltaická pole jsou základním stavebním kamenem každé fotovoltaické elektrárny. Tato pole produkují elektrickou energii a je tedy důležité provést jejich správný výběr. Po určení účelu a lokace fotovoltaické elektrárny bývá určení počtu a typu polí dalším krokem. Na základě toho je pak možné dimenzovat ostatní komponenty fotovoltaické elektrárny a také určit instalovaný výkon. [43]

3.5.1 Fotovoltaický článek

Základem fotovoltaických elektráren jsou fotovoltaické články. Prakticky se jedná o polovodičovou diodu, která se skládá ze dvou spojených destiček, kde jedna je typu P a druhá typu N. Tyto dvě vrstvy vytvářejí přechod PN. Osvětlením článků poté vzniká fotoelektrický jev a z krystalových mřížek se začnou uvolňovat nosiče náboje. K podrobnému popsání a vysvětlení tohoto chování slouží pásový model. Podrobné popsání pásového modelu je velmi složité. Touto problematikou se zabývá fyzika pevných látek a pro naše účely není další rozbor potřebný. [43][13]

Nejčastěji se v praxi setkáváme s panely na bázi křemíku. Křemík je druhý nejrozšířenější prvek na Zemi. Pro výrobu fotovoltaických článků je zapotřebí extra čistý křemík. Ten se získává z oxidu křemičitého nejprve pomocí redukční reakce v obloukové peci a následným čištěním, nejčastěji se používá chemická metoda. Pro fotovoltaické aplikace jsou běžně používané 3 formy křemíku. Amorfni, polykrystalický a monokrystalický.[43]

- Amorfni křemík – tato forma nemá pravidelnou krystalickou strukturu. Tento typ se využívá nejčastěji u tenkovrstvých technologií. Tenkovrstvé články se vyrábějí jinou technologií než články polykrystalické nebo monokrystalické. Nejčastěji je používána technologie napařování tenkých vrstev na podložku. Celý panel tak může být tvořen jediným velkým článkem. Běžně se však používá článků více. Články z amorfniho křemíku mají zhruba o polovinu nižší účinnost než články z krystalických forem křemíku. Mají ale menší závislost účinnosti na teplotě. Také jsou daleko méně náchylné na dopadající směr záření a hodí se tedy v aplikacích, kde není možné zaručit ideální orientaci panelů. Například na fasády staveb.[43] [5]
- Polykrystalický křemík – výroba polykrystalického křemíkového ingotu je následující. Rozžhavená tavenina velmi čistého křemíku se nalije do nádob, ve

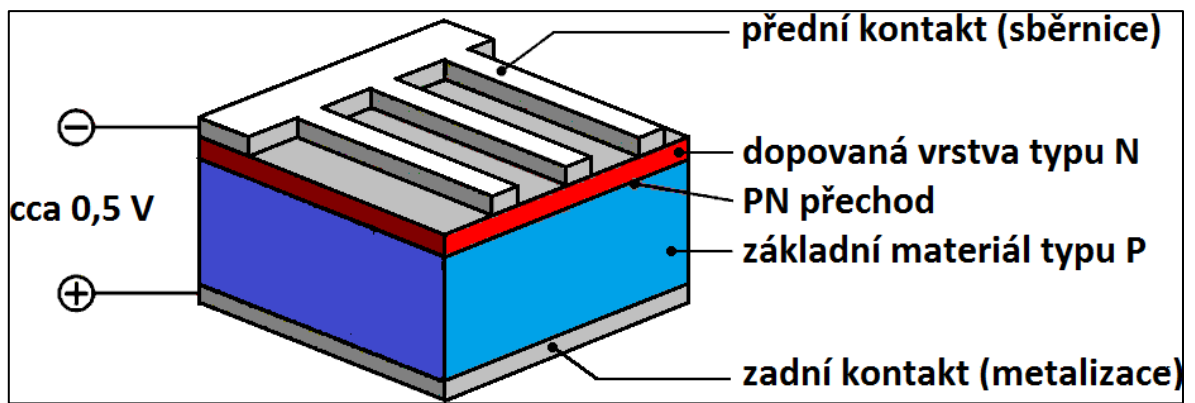
²³ OEZ s.r.o. *Obecné schéma FV zdroje pracujícího paralelně s distribuční sítí* [online]. Letohrad

kterých se pak definovanou rychlostí nechá zchladnout. Tento proces je energeticky i finančně méně náročný než výroba monokrystalických ingotů. V porovnání s monokrystalickým článkem se články z polykrystalického křemíku vyznačují nižší účinností přeměny sluneční energie a rychlejší degradací. Pro výrobu fotovoltaických panelů je však polykrystalický křemík stále nejpoužívanějším materiálem, neboť má nejlepší poměr účinnost/cena. [43] [5][78]

- Monokrystalický křemík – k výrobě monokrystalického křemíkového ingotu se využívají v dnešních dnech dvě metody. Czochralského metoda a metoda zonální tavby. Článek z monokrystalického křemíku má nejvyšší účinnost ze všech třech forem. Od polykrystalických destiček se dá rozeznat snadno, neboť má jednoduchou a jednobarevnou strukturu. Také, na rozdíl od polykrystalických destiček, je možnost na povrchu článku vytvořit pomocí leptání texturovaný povrch. Tato úprava slouží k tomu, že méně slunečního záření je odraženo zpět a roste tak účinnost celkové přeměny energie. [43]

Existují i články, založené na jiných polovodičových strukturách a i články jiných konstrukcí. Rozmach zažívají tenké vrstvy a tandemové struktury. Tandemové články se skládají z několika polovodičových vrstev, kde každá vrstva pohlcuje světlo v určitém frekvenčním pasu. Tímto je možné využít větší část dopadajícího spektra. Tyto články mívají dokonce i vyšší účinnost, ale bývají také o mnoho dražší a stále jsou předmětem výzkumu. V našich podmínkách však jiné typy článků než křemíkové nacházejí zřídka použití a proto se jimi nebudu hlouběji zabývat. Na internetu existuje mnoho stránek zabývajících se novými trendy ve fotovoltaice. Jeden z těchto webů je například www.sciencedaily.com, kde jsou denně aktualizovány vědecké články, nejen ze světa fotovoltaiky. [5] [1]

Bylo vysvětleno, že fotovoltaický článek je založen na polovodičových strukturách. Aby takový článek mohl být zapojený do elektrického obvodu, je potřeba na něm vytvořit kontakty. Jelikož PN přechod je orientován kolmo ke směru slunečním paprskům, je nutné vytvořit kontakt na přední i zadní straně. Od kontaktu na přední straně se vyžaduje, aby zakrýval co nejmenší část článku a tak na jeho povrch mohlo dopadat co nejvíce slunečního záření. Tyto kontakty, také nazývány sběrnice, mívají tvar mřížky nebo hřebínku. Zadní kontakt pak může být jednoduchý, pokud se nejedná o oboustranný panel, kde světlo může přicházet i zezadu. V takovém případě má pak zadní kontakt stejný tvar jako kontakt přední. Následující Obrázek 7 zobrazuje schematicky strukturu takového článku.



Obrázek 7: Struktura fotovoltaického článku²⁴

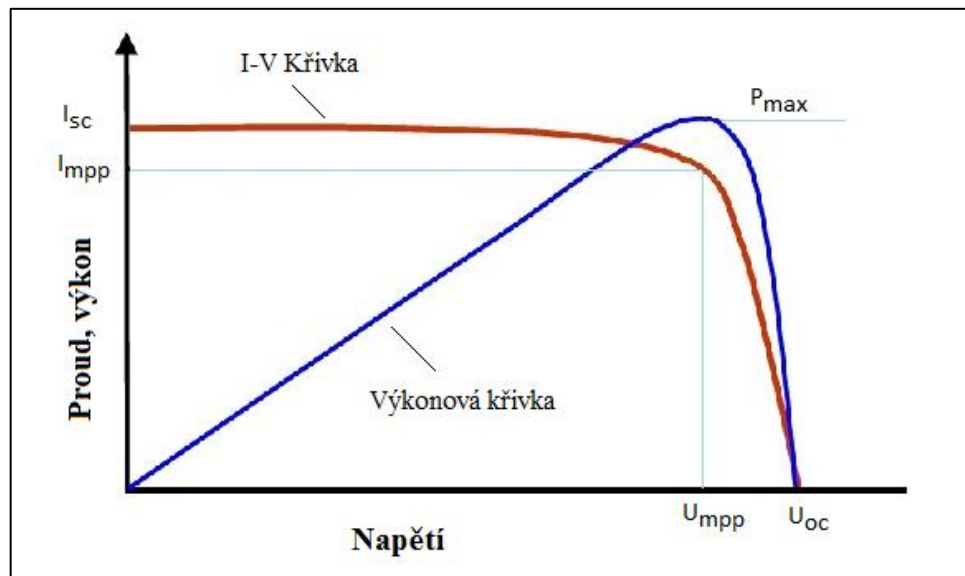
Důležité vlastnosti pro nás jsou voltampérové charakteristiky těchto článků. Pomocí nich jsme schopni určit, jak se článek, potažmo celý panel, bude chovat při různých teplotách a intenzitách osvětlení. Nejdříve je potřeba vysvětlit nejdůležitější body těchto charakteristik. [5]

- U_{oc} – napětí naprázdno. Napětí, které naměříme na nezapojeném a osvětleném článku.
- I_{sc} – proud nakrátko. Proud, který naměříme na osvětleném článku, pokud ho vyzkratujeme.
- MPP – bod maximálního výkonu (Maximal power point). Pracovní bod na charakteristice, ve kterém článek produkuje největší výkon. Tomuto bodu odpovídá napětí U_{mpp} a proud I_{mpp} .
- FF – plnicí faktor (Fill faktor) – Bezrozměrné číslo, které udává poměr maximálního dosažitelného výkonu a součinu proudu nakrátko a napětí naprázdno. Může dosahovat hodnot od 0 do 1 a platí zde pravidlo, že čím vyšší hodnota, tím lepší. Vzorec vypadá následovně:

$$FF = \frac{U_{mpp} \cdot I_{mpp}}{U_{oc} \cdot I_{sc}} [-] \quad (7)$$

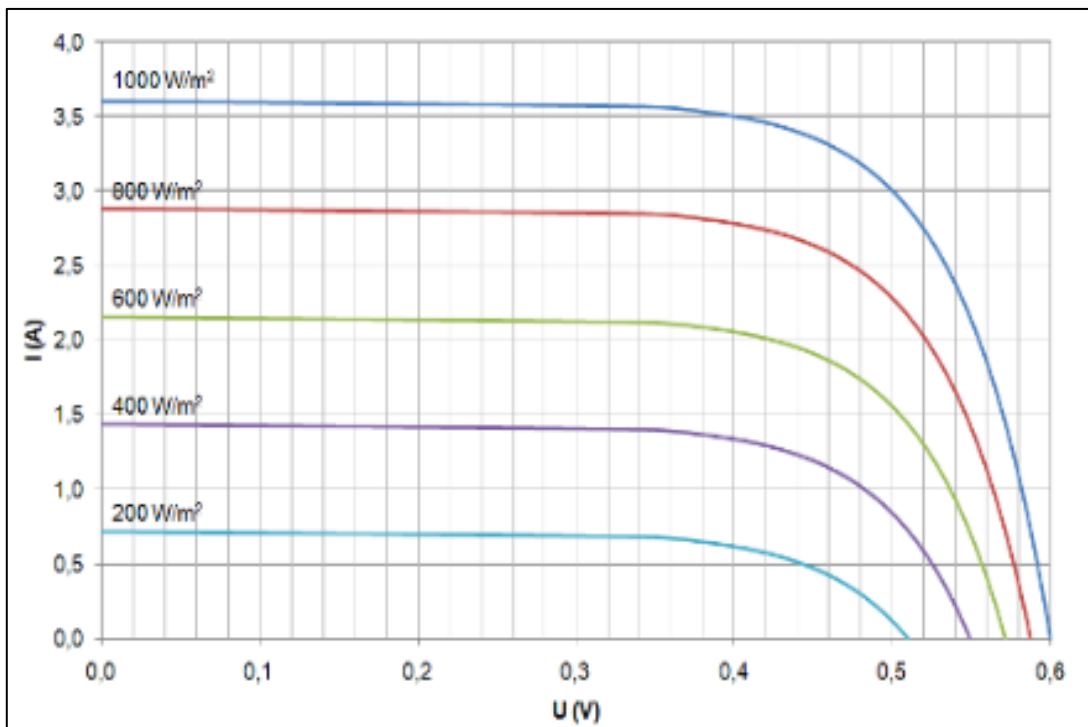
²⁴ TZB-info. *Struktura fotovoltaického článku* [online]. Praha: Topinfo s.r.o, 2014

Typickou voltampérovou charakteristiku a výkonovou křivku pro křemíkový článek zobrazuje Obrázek 8.



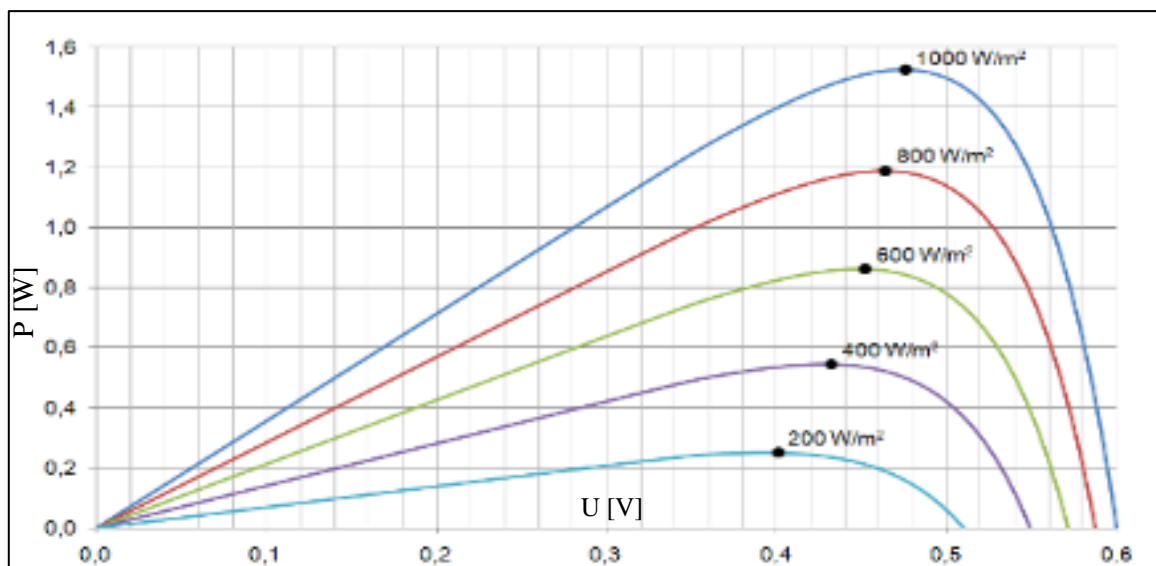
Obrázek 8: Obecná voltampérová charakteristika fotovoltaického článku²⁵

Dva nejdůležitější faktory, které ovlivňují voltampérovou charakteristiku, jsou intenzita ozáření a teplota. Nejprve se podívejme na intenzitu ozáření. Obrázek 9 zobrazuje voltampérové charakteristiky stejného článku při různých intenzitách ozáření. Je vidět, že se zvyšující se intenzitou osvětlení roste hodnota I_{sc} a v malé míře i U_{oc} . Je tedy zřejmé, že s rostoucí intenzitou osvětlení roste i maximální možný výkon, jak ukazuje Obrázek 10.



Obrázek 9: Závislost Voltampérových charakteristik na intenzitě ozáření²⁶

²⁵ MyElectrical Engineering. *Photovoltaic (PV) - Electrical Calculations* [online].

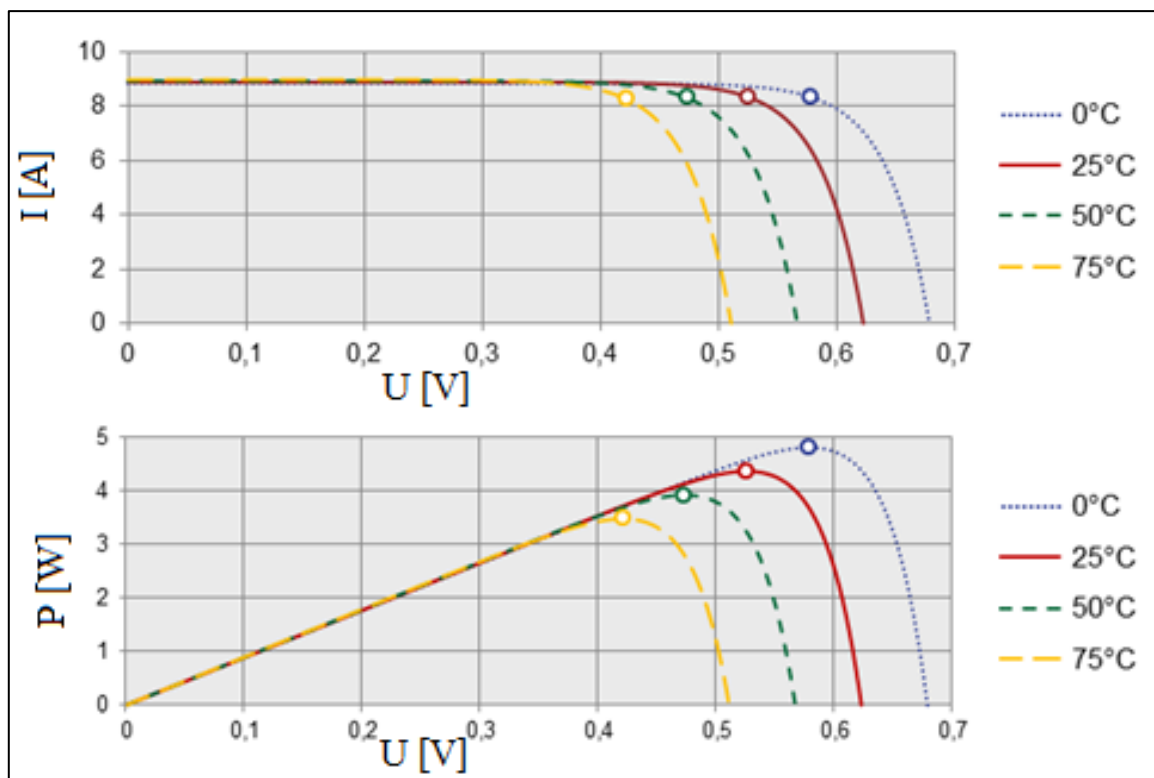


Obrázek 10: Závislost výkonových křivek FV článku na intenzitě ozáření²⁷

Vliv rostoucí teploty na voltampérovou charakteristiku a výkonovou křivku ukazuje Obrázek 11. S rostoucí teplotou mírně stoupá proud nakrátko, ale významně klesá napětí naprázdno. Maximální dosažitelný výkon tedy s rostoucí teplotou klesá. Tento fakt je nutné brát v úvahu při projektování fotovoltaického systému. V letních měsících při bezvětrí se může tmavý povrch rozpálit a jeho teplota může dosahovat i o několik desítek stupňů Celsia více, než je teplota okolí. Je tedy potřeba myslet i na ventilaci panelů a na to, že vysoká teplota může zapříčinit nižší výkon i při vyšších hodnotách ozáření.

²⁶ CHMEL, Ladislav a Ivo HAMERNÍK. *Fotovoltaika, Fototermika: Podpora přírodovědného a technického vzdělávání na středních školách v Jihomoravském kraji* [online]. 2015

²⁷ CHMEL, Ladislav a Ivo HAMERNÍK. *Fotovoltaika, Fototermika: Podpora přírodovědného a technického vzdělávání na středních školách v Jihomoravském kraji* [online]. 2015



Obrázek 11: Závislost V-A charakteristiky a výkonové charakteristika FV článku na teplotě²⁸

3.5.2 Standardní testovací podmínky

Aby mohly být jednotlivé fotovoltaické články a panely mezi sebou vzájemně porovnávány, je potřeba stanovit standardní testovací podmínky, zkráceně STC (z anglického Standard test condition). Tyto podmínky byly stanoveny takto:

- $I = 1000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ (Intenzita ozáření)
- $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ (Teplota článku)
- $AM = 1,5$ (Koeficient vzdušné masy)

Výkon článku nebo panelu musí být udáván za těchto podmínek. Dále by v datasheetu produktu mělo být uvedeno, jak se jednotlivé vlastnosti mění v závislosti na změně teploty, případně intenzity ozáření.[5]

Rozměry fotovoltaického článku záleží na průměru křemíkového ingotu, ze kterého byl vytvořen. Může dosahovat rozměrů až $200 \times 200 \text{ mm}$. Jeden článek mívá běžně výkon zhruba $2,5 \text{ W}$ a jeho napětí naprázdno a proud nakrátko je přibližně $0,5 \text{ V}$ a 5 A . [43][5]

3.5.3 Solární panely (moduly)

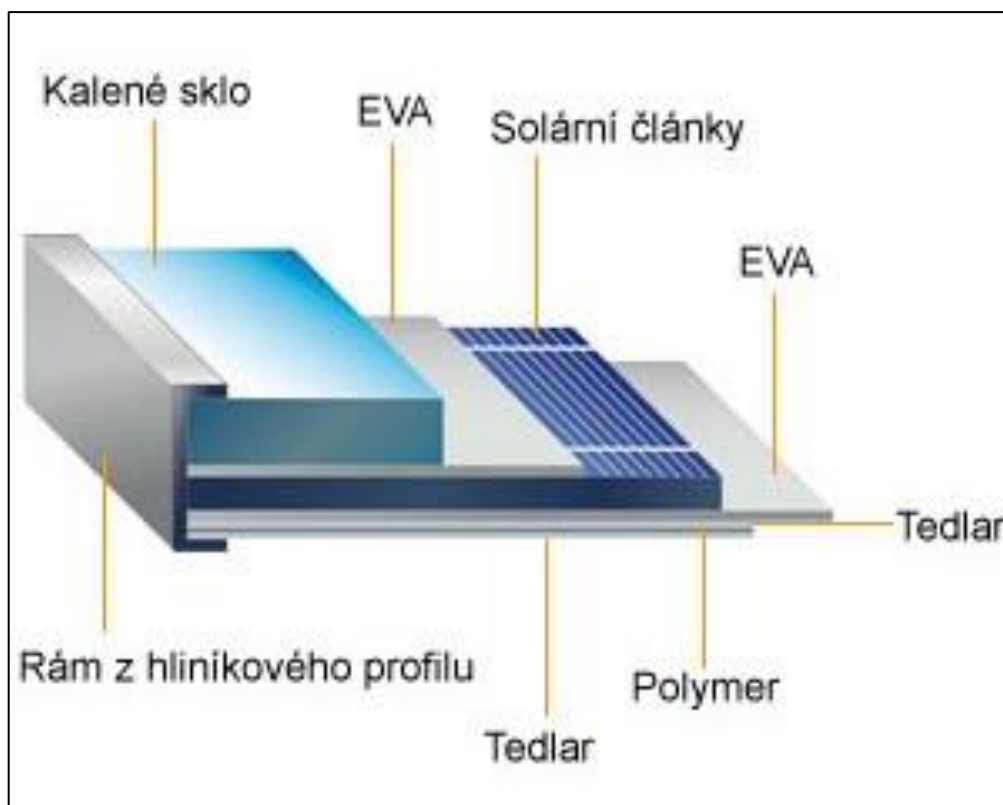
Jednotlivé články nemají samy o sobě dostatečný proud a ani napětí. Je tedy potřeba tyto články řadit do sériových a paralelních kombinací. Sériovou kombinací naroste výsledné napětí na součet napětí jednotlivých článků. Proud všemi články je stejný. Naopak u

²⁸ MERTENS, Konrad. *Photovoltaik - Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis* [online]. 3. Mnichov: Carl Hanser, 2015 [cit. 2016-12-22]. ISBN 978-3-446-44232-0.

paralelní kombinace se sčítají jednotlivé proudy a napětí je konstantní. Názvosloví se používá následující:

- Spojení více článků do série se nazývá **řetězec** (anglicky string).
- Spojením řetězců vznikne **panel** (anglicky module).
- Spojení více modulů se nazývají opět **řetězec**, a z nich mohou být složena fotovoltaická **pole** (anglicky array). [5]

Řez fotovoltaického panelu ukazuje Obrázek 12. Samotný panel se skládá z několika vrstev. Na vrchní straně je kalené sklo, které slouží jako mechanická ochrana se schopností propouštět světlo. Na jejím povrchu bývá antireflexní vrstva, která minimalizuje světelný odraz na povrchu panelu a tak zvyšuje účinnost fotovoltaické přeměny. Pod touto vrstvou je plastová vrstva EVA (etylvinylacetát), která slouží jako těsnicí hmota. Pod ní se již nacházejí samotné propojené články. Pod články je znova EVA a pod ní již zadní stěna tvořena většinou z laminátové kompozice, např. Tedlaru. Z těchto vrstev je odsán přebytečný vzduch a panel se zahřeje na teplotu tání EVA, čímž dojde k jejímu natavení a zalití článků. Vše je následně umístěno do hliníkového rámu, utěsněno tmelem a do svorkovnice se vyvedou kontakty. [43]



Obrázek 12: Složení fotovoltaického panelu²⁹

U instalovaných panelů jsou důležité hodnoty jejich orientace a sklonu. Oba tyto požadavky vycházejí z pohybu slunce po obloze. Ideální azimutální orientace přední strany panelu je buďto směřována k jižnímu nebo k severnímu pólu. To v závislosti na tom, na jaké polokouli se systém nachází. Pokud je panel na severní polokouli, má být orientován na jih a naopak. Optimální sklon již tak snadno určit nelze. Sklon se může pohybovat od 0°

²⁹ RD Solar. *SOLÁRNÍ PANELE* [online]. Ústí nad Labem

do 90° a jeho ideální hodnota závisí na způsobu užití. Obecně platí, že nejvíce energie bude panel produkovat, pokud sluneční paprsky budou dopadat kolmo na přední desku. Pokud chceme, aby vyrobené elektrické energie v průběhu roku bylo co nejvíce, tak orientace panelů musí být taková, aby sluneční záření dopadalo kolmo na přední panel právě v poledne. Tato hodnota úhlu se v průběhu roku mění a proto je vhodné panel, pokud to jde, v průběhu roku přenastavit. Pokud přenastavení možné není, volíme úhly takové, aby vyhovovaly letním měsícům. Občas je možné zvolit větší úhel a to v prostředích, kde je vysoký podíl odraženého záření anebo pokud je požadavek, aby nebyl tak velký výkonový rozdíl mezi letním a zimním obdobím. To můžeme například vyžadovat u ostrovních systémů, kdy je energie potřebná hlavně v zimě na vytápění a ohřev vody. [47]

Vždy je potřeba řadit do kombinací stejné články nebo panely. Proud u sériových kombinací má vždy stejnou hodnotu jako článek s nejnižším proudem. U paralelních kombinací je to obdobně s napětím. To znamená, že pokud je jeden článek vadný anebo je méně osvětlen, například vlivem stínu nebo spadného listí, dochází k poklesu výkonu celého řetězce. Zároveň je tento článek nebo panel přetěžován a může dojít k jeho zničení. Aby bylo zabráněno omezení výkonu a zničení článku, zařazují se do obvodu překlenovací diody (anglicky bypass diodes). [5]

3.5.4 Svorkovnice

Svorkovnice (anglicky Junction box) se nachází na zadní straně každého fotovoltaického panelu. V této krabičce jsou pospojovány jednotlivé řetězce článků a bývají zde umístěny i bypass diody. Výstupy junction boxů tvoří konektory, které slouží pro jednoduché propojení kabelů. [64]

3.5.5 Nosné konstrukce

Hlavním úkolem nosných konstrukcí je vytvořit pevné spojení mezi fotovoltaickými panely a podkladem. Na nosné konstrukce jsou kladeny mnohé požadavky. Musí být konstruovány tak, aby kromě váhy panelů a veškerého příslušenství byly schopné vydržet i další přidružené síly. Například váhu sněhu či námrazy v zimních měsících nebo působení silného větru. Zároveň musí odolávat i chemickým vlivům jako je například křehnutí, stárnutí nebo koroze. Další, čemu musí nosné konstrukce odolávat, mohou být rostliny nebo živočichové. Ti mohou poškodit jak nosnou konstrukci, tak i panely. V případě poruchy nebo úderu blesku musí také zajišťovat ochranu a pokud možno minimalizovat škody na zařízení. U instalací, kde je možná libovolná orientace, bývají nosné konstrukce navrženy tak, aby panely měly optimální polohu. Při použití fotovoltaických instalací na budovách je také často kladen požadavek, aby tyto konstrukce nenarušovaly estetický vzhled budovy. Zároveň musí být zajištěno dostatečné chlazení panelů, aby nedocházelo k jejich přehřívání a tím pádem k poklesu výkonu. V neposlední řadě je také důležité, aby pokud možno co nejvíce odolávaly vandalismu a nevhodnému užívání. [43]

Nosné konstrukce můžeme rozdělit do dvou kategorií. Na konstrukce statické a na konstrukce pohyblivé. Statické konstrukce mají pevně danou orientaci a úhel

sklonu. Existují i konstrukce, kde se dá měnit úhel sklonu v průběhu roku, ale nastavování probíhají manuálně a tato řešení se používají spíše u systémů menších výkonů. [43]

Pohyblivé konstrukce mají kromě všech výše zmiňovaných vlastností ještě další funkci. Maximalizují energetický zisk tím, že fotovoltaické panely natáčejí, aby měly pokud možno co nejdéle dobu ideální orientaci vůči poloze slunce na obloze. Těmto systémům se říká heliostatické. Dělí se na konstrukce s jednou pohyblivou osou a na konstrukce s dvěma pohyblivými osami. Abychom zjistili, o kolik více energie lze získat z heliostatických stánek, provedeme teoretický výpočet s následujícími předpoklady. Po celý den je intenzita slunečního záření konstantní a průměrná délka svitu je $T_{ss} = 12$ hod. Porovnáme dva systémy. Jeden je pohyblivý, dokonale sledující trajektorii Slunce a druhý je pevný, který je orientován kolmo k dopadajícímu záření pouze v pravé poledne. Dopadající úhel záření se v průběhu dne mění z $-\pi/2$ do $+\pi/2$. Úhlová rychlost slunce po obloze je:

$$\omega = \frac{2\pi}{T_{den}} = 7,27 \cdot 10^{-5} [rad.s^{-1}] \quad (8)$$

Ozařovaná plocha fotovoltaického panelu může být vyjádřena jako $S_0 \cdot \cos \omega t$. Potom pro pevný panel platí:

$$W_{pevný} = \int_{-T_{ss}/2}^{T_{ss}/2} I * S_0 * \cos(\omega t) dt = \frac{2 * I * S_0}{\omega} [W.m^{-2}; m^2; rad.s^{-1}] \quad (9)$$

U pohyblivého stánek je neustále ozařována celá plocha panelu a tudíž

$$W_{pohyb} = I * S_0 * T_{ss} [W.m^{-2}; m^2; s] \quad (10)$$

Porovnáním obou rovnic získáme

$$W_{pohyb} = \frac{\pi}{2} W_{pevný} \quad (11)$$

Z výpočtů je vidět, že z pohyblivých systémů by za takovýchto podmínek bylo možno získat o zhruba 57 % více energie. Tohoto výsledku však nemůže být nikdy dosaženo, neboť není brán v úvahu vliv zemské atmosféry. Skutečný rozdíl mezi těmito systémy je potřeba řešit složitějšími výpočty, kde se využívají dostupná meteorologická a astronomická data, případně dlouhodobým měřením. Pohyblivé systémy jsou také dražší a kvůli pohyblivým součástem i nákladnější a složitější na údržbu. Jejich nasazení se z ekonomického hlediska vyplatí v oblastech s velkým podílem přímého slunečního záření a s velkým počtem slunečních hodin. [43]

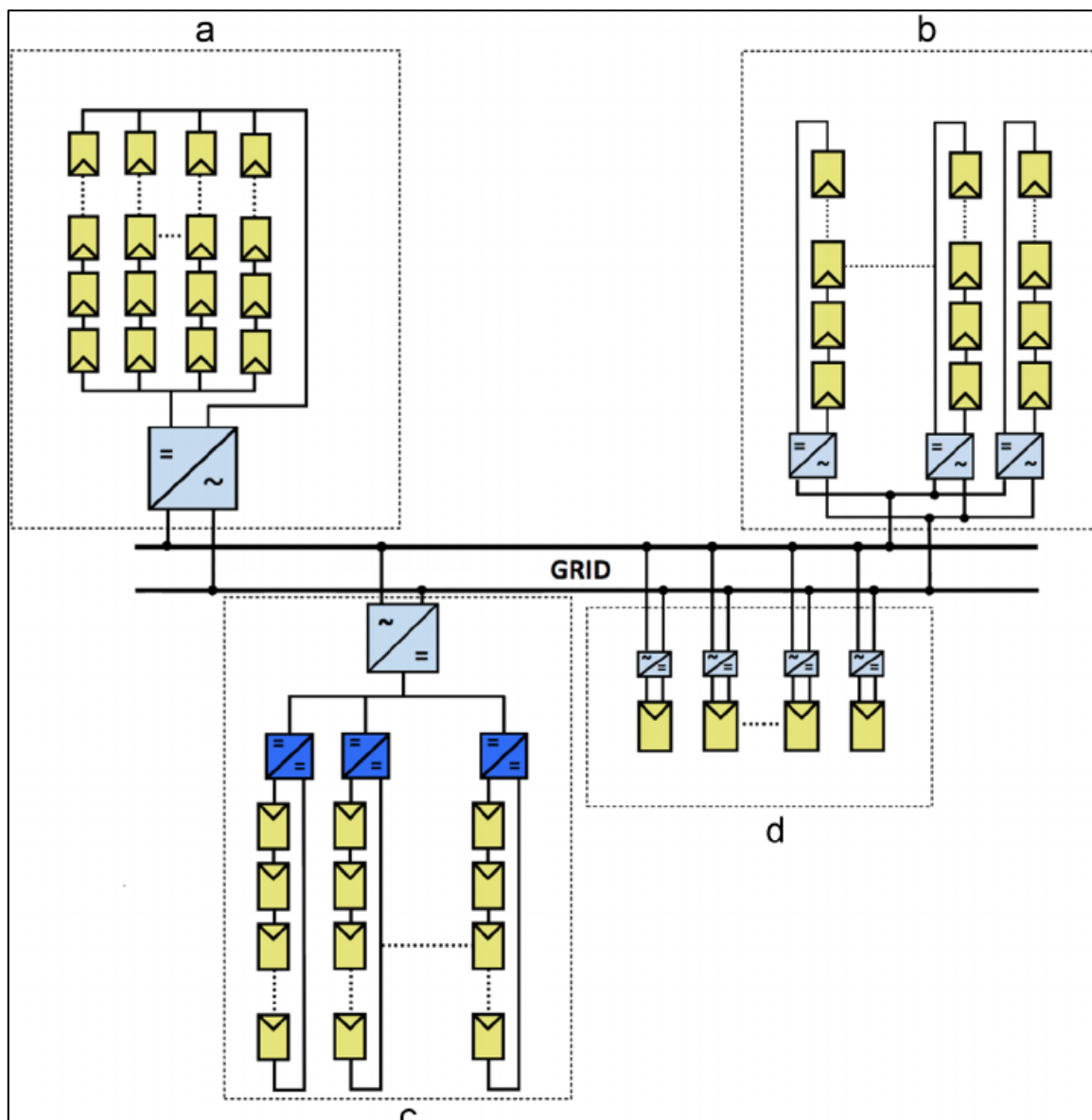
U větších elektráren, kde jsou panely umístěny v mnoha řadách, je důležité dát pozor na to, aby se panely vzájemně nestínily. To může nastat zejména v zimních měsících, kdy je slunce nízko nad obzorem a stíny jsou dlouhé. V podmínkách České republiky se uvádí minimální sklon Slunce nad obzorem 17 stupňů. Obecně se ale dá použít pravidlo, že mezi stánek a spodní hranou nejnižšího panelu má být rozstup 3x větší než je výška stánek. [5]

3.6 Střídače

Fotovoltaické články produkují stejnosměrný proud. To u některých aplikací, jako je například ohřev vody nebo dobíjení akumulátorů, nevadí. Pokud ale chceme vyrobenou elektřinu dodat do sítě nebo ji spotřebovat běžnými spotřebiči, je zapotřebí přeměnit stejnosměrný proud na střídavý. Střídače používají výkonové polovodičové součástky, jejichž spínáním a rozpínáním dochází ke tvorbě výstupního napětí. Zapojení součástek, rychlost spínání a celková konstrukce se mohou významně lišit. V základě rozlišujeme dva druhy střídačů a sice s transformátorem a bez transformátoru. Střídače s transformátorem jsou vývojově starší, bývají těžší a kvůli ztrátám na transformátoru mají i nižší účinnost. Na druhou stranu mají galvanicky oddělené obvody a konstrukčně bývají snadnější a levnější. Střídače bez transformátoru bývají poruchovější právě kvůli absenci galvanického oddělení.

Střídače mohou být s fotovoltaickými panely spojeny několika způsoby, jak ukazuje Obrázek 13. Rozlišujeme tyto čtyři základní typy:

- Centrální střídač (a) – na jeden střídač jsou připojené stovky až tisíce panelů.
- Řetězcový střídač – každý řetězec má svůj vlastní MPPT. Podle počtu řetězců připojených na střídač rozlišujeme řetězcové střídače:
 - Pro každý řetězec (b)
 - Pro více řetězců (c)
- Modulový střídač (d) – střídač je na každém panelu. Používá se pouze pro malé systémy.



Obrázek 13: Typické konfigurace zapojení střídačů: (a) Centrální, (b) Single string, (c) Multi string, (d) Modulové zapojení [42]

Vždy je potřeba dohlédnout na to, aby výkon panelů odpovídal výkonu střídače. Střídač dokáže pracovat pouze v určitém rozmezí napětí a výkonu. Jak již bylo řečeno dříve, výkon fotovoltaických panelů je silně závislý na vnějších podmínkách a je důležité, aby byl střídač schopný dodávat energii do sítě za všech možných pracovních stavů. S výkonem je i úzce spjatý MPPT (Maximal power point tracker). Jak bylo ukázáno v kapitole 3.5.1, maximální hodnota výkonu se nachází pro fotovoltaické panely v určitém bodu pracovní charakteristiky. MPPT zajišťuje pomocí výkonové elektroniky, aby střídač pracoval právě v tomto bodě. Každý panel má své vlastní ideální hodnoty napětí a proudu, neboť každý panel může pracovat za lehce odlišných podmínek. Je tedy zřejmé, že střídač s MPPT, na který je napojeno větší množství panelů, má nižší celkový maximální výkon než součet maximálních výkonů jednotlivých panelů. Řešení s vlastními střídači pro každý panel by však vyžadovalo velké investice, přičemž by energetický zisk nemusel být ve výsledku tak velký. Ovšem v takovém případě by při poruše jednoho střídače byla ztráta

dodávaného výkonu minimální. Vždy je tedy nutné promyslet, jak panely se střídačem zapojíme. [5]

Další, na co musí být brán zřetel, je napěťové rozpětí, při kterém je střídač schopný pracovat. Jak již bylo zmíněno v kapitole 3.5.1, se změnou teploty se výrazně mění napětí naprázdno a tudíž by při velkých teplotách mohlo napětí klesnout pod pracovní minimum a střídač by byl zbytečně odpojen. Riziko hrozí i při nízkých teplotách, kdy by naopak mohlo dojít k přepětí. [5]

Do dnešních střídačů bývají integrovány další funkce, které zjednodušují obsluhu nebo spolupracují se sítí. Střídač musí dokázat určit hodnoty ze sítě jako jsou napětí a frekvence a určit, zdali síť pracuje v pořádku nebo jestli má poruchu. Pokud síť pracuje v pořádku, je její frekvence určena jako referenční a střídač se může automaticky připojit k síti. Pokud síť nepracuje v povolených intervalech napětí a proudu, musí být střídač od sítě odpojen, neboť by mohlo dojít k ohrožení majetku a osob. To neplatí pro stav, kdy má FVE podporovat síť při náhlém výpadku zdroje. [10]

Dále mohou být ve střídači obsaženy další měřicí, monitorovací a ochranná zařízení, která mohou zpracovávat naměřená data a informace o stavu střídače na dálku. To velmi zjednodušuje monitoring a ovládání větších elektráren. [5]

Je nutné také zvážit, v jakých pracovních podmínkách bude střídač pracovat. Obecně je snaha, aby střídač nebyl vystaven přímému slunečnímu záření, byl v suchém a bezprašném prostředí a nedocházelo k překračování dovolených pracovních teplot. Zároveň ke střídačům musí být umožněn přístup, kvůli opravám a revizím. [43]

3.7 Kabely

Velké fotovoltaické elektrárny se mohou skládat z mnoha panelů. Tyto panely je potřeba mezi sebou vzájemně propojit a následně spojit se střídači. Výstupy střídačů jsou následně vyvedeny na transformátory nebo připojeny rovnou do sítě. K těmto účelům je zapotřebí velké množství propojovacích kabelů. U FVE se v základu vyskytují dva typy kabelů. Kabely pro stejnosměrný proud a kabely pro střídavý proud. Rozdělovacím místem je střídač. Při výběru kabelů je potřeba dbát na jejich proudová, napěťová a výkonová omezení. Také je potřeba brát v úvahu pokles napětí u delších kabelů s menším průřezem. Kabely pro stejnosměrný proud také rozlišují kladný a záporný pól, které nesmějí být mezi sebou prohozeny. V dnešních dnech již bývají tyto kabely osazeny standardizovanými konektory, které riziko špatného zapojení minimalizují. Často také bývají kabely vyvedené ze stringů společně spojeny ve slučovači (angl. PV Combiner Box), čímž se redukuje počet potřebných kabelů. [5]

3.8 Transformátor

Transformátor je zařízení, které obecně slouží k přeměně střídavého napětí jedné hodnoty na střídavé napětí jiné hodnoty při zachování frekvence. Mohou být jednofázové nebo trojfázové. U FVE slouží transformátory k přeměně nízkého napětí na výstupu střídačů na napěťovou hladinu sítě. Pro účely fotovoltaických elektráren mohou být použity běžné,

sériově vyráběné transformátory. Na štítkách transformátorů bychom měli najít tyto hodnoty:

- Primární napětí – primárním napětím označujeme napětí na primární cívice transformátoru, na které se vztahují provozní charakteristiky. Tímto napětím může být transformátor trvale zatížen za normálních pracovních podmínek.
- Sekundární napětí – napětí, které bude měřeno na sekundární vinutí transformátoru, pokud na primární straně bude jmenovité primární napětí. Toto napětí je dáno poměrem počtu závitů na cívkách transformátoru.
- Jmenovitý výkon – zdánlivý výkon, který je na výstupních svorkách transformátoru při jmenovitém proudu a sinusovém napětí na vstupních svorkách. Udává se v jednotkách VA
- Zapojení vinutí – jednotlivá vinutí transformátoru mohou být zapojena buďto do trojúhelníku (D), hvězdy (Y), uzemněné hvězdy (Yn) nebo lomené hvězdy (Z). Popisek se skládá ze dvou písmen a jedné číslovky. Velké písmeno značí zapojení primárního vinutí. Číslice značí hodinový úhel, který odpovídá fázovému posunu fázoru vyššího napětí k fázoru nižšího napětí ve smyslu sledu fází.

Kromě těchto hodnot jsou také často požadovány hodnoty ztrát nakrátko a ztrát naprázdno. Tyto ztráty snižují účinnost transformátoru. U transformátorů pro FVE bývají často používány nízkoztrátové transformátory. Tyto transformátory bývají dražší, ale tato investice může být v průběhu let navrácena vyššími dodávkami energie. Je proto dobré při pořizování transformátoru zvážit i tuto variantu. [86]

3.9 Měřicí zařízení elektrické energie

Měřicí zařízení elektrické energie jsou důležitou součástí fotovoltaických systémů, neboť na základě údajů z nich je účtováno množství dodané energie do sítě. Měření je nutné provádět dle vyhlášky MPO č. 82/2011 Sb.³⁰ Měření probíhá na předávacím místě mezi výrobnou a provozovatelem elektrizační soustavy. Obvykle tam, kde elektřina přechází ze zařízení provozovatele výroby do zařízení provozovatele soustavy. Tímto je zajištěno, že je počítána pouze čistá dodávka do sítě po odečtení veškerých ztrát a vlastní spotřeby. Elektroměr je majetkem provozovatele distribuční soustavy, který je zároveň zodpovědný za jeho správu. Používá se čtyřkvadrantový elektroměr, který dokáže od sebe rozlišit odběr ze sítě a dodávku do ní a tyto údaje zaznamenat. Tyto elektroměry musejí být ověřovány v autorizovaných metrologických střediscích v zákonem stanovených lhůtách. Pro vlastní účely bývá tento elektroměr instalován i provozovatelem výroby za účelem lepší kontroly. [43]

³⁰ Vyhláška č. 82/2011 Sb., o měření elektřiny a o způsobu stanovení náhrady škody při neoprávněném odběru, neoprávněné dodávce, neoprávněném přenosu nebo neoprávněné distribuci elektřiny. In: *Sbírka zákonů*. Praha, 2011, částka 31.

3.10 Odpínače a ochrany

Hlavní odpínače slouží ke kompletnímu odpojení zařízení, části systému nebo celému systému od sítě. Každý střídač má vypínače jak na straně stejnosměrného napětí, tak na straně střídavého napětí. Bývají umístěny bezprostředně u vstupu a výstupu střídače. Úkolem jističů a pojistek je zamezit průtoku nebezpečného proudu při poruchách a zabránit tak poškození součástek a ohrožení zdraví osob. U FVE je používán jak stejnosměrný proud, tak střídavý proud. Pojistky a jističe pro střídavý a stejnosměrný proud se od sebe výrazně liší, je tedy zapotřebí do správných úseků instalovat správné pojistky. Zároveň musejí být dostatečně selektivní, neboť maximální proud fotovoltaického panelu je omezen I_{sc} , který není tolik rozdílný od provozní hodnoty proudu. Jištěny bývají veškeré důležité komponenty. [5]

3.11 Defekty fotovoltaických elektráren

Příčin defektů FVE může být mnoho. Zamezit všem příčinám není možné, ale je možné se snažit riziko a případné škody minimalizovat. Vyjmenujme tedy aspoň některé z nich:

- Materiálové, konstrukční – tyto vady vznikají již při výrobě a koncový zákazník je nemůže ovlivnit. Důslednou kontrolou a zkouškami je ale lze včas odhalit a problém řešit, případně výrobek reklamovat dříve, než dojde k rozsáhlejším škodám. Minimalizovat toto riziko také lze vhodným výběrem výrobce.
- Neodborná manipulace, instalace a údržba – je potřeba, aby veškerou manipulaci prováděli odborníci, případně vyškolený personál. Tímto se předejde zranění, škodám a ztrátě záruky.
- Přírodní vlivy – na fotovoltaické panely působí přírodní vlivy jako je déšť, bouřka, vítr, kroupy nebo sníh. Správně dimenzovaná konstrukce, dobré zemnění a dostačující krycí vlastnosti mohou pravděpodobnost poruchy minimalizovat.
- Poškození zvěří, poškození třetí osobou, krádež – mechanická poškození, kterým lze vzdorovat vhodnými bezpečnostními opatření, jako je monitoring, oplocení případně zajištěním bezpečnostní služby.
- Blesk, přepětí – je potřebné mít dostatečné ochrany, hromosvod a zemnění. Přímý úder blesku pravděpodobně komponent nevydrží, ale správnou konstrukci je možné následné škody pokud možno minimalizovat.
- Stárnutí – veškeré materiály v průběhu času stárnou a ztrácejí své vlastnosti. To bývá zapříčiněno okolními vlivy, provozním namáháním a dalšími faktory. Zabránit procesu stárnutí nelze, ale vodným výběrem výrobce, který provádí dostatečné testy spolehlivosti, lze vlivy stárnutí minimalizovat.

Předcházení rizik a minimalizace dopadů se nesmí podceňovat. Vady a poruchy se mohou rozšířit a mohou poškodit i ostatní komponenty. Navíc detekce těchto chyb není vždy jednoduchá, obzvláště u velkých elektráren. Další, co hrozí, je bezpečnostní riziko pro obsluhu zařízení. Tento stav nesmí nikdy za žádných okolností nastat. [3]

3.12 Záložní výkon a akumulace

Akumulace elektrické energie ve velkém objemu je problém, se kterým se energetika potýká již od svých počátků. S rozvojem OZE je tento nedostatek stále palčivější, neboť do energetické soustavy je připojováno stále více zdrojů, jejichž výrobu je prakticky nemožné ovlivňovat a ke všemu je jejich výroba i těžko predikovatelná. Jedinou možností pro akumulaci velkého množství elektrické energie jsou v současné době přečerpávací elektrárny. Intenzivní výzkum probíhá na poli palivových článků a akumulátorů. Tyto technologie zatím nejsou schopny z ekonomického hlediska uspokojit požadavky na uložení elektrické energie. Velká očekávání jsou kladena na rozvoj elektromobility. Akumulátory vozů připojených do inteligentních nabíječek by mohly sloužit jako rozsáhlý akumulací systém. O tom, zdali budou tato očekávání naplněna, se zatím dá jenom spekulovat a pouze čas ukáže. Já osobně bych však v tomto ohledu byl skeptický. Rozvoj elektromobility na našem území probíhá. Neustále přibývají nové dobíjecí stanice a trh s elektromobily se neustále rozšiřuje. K vytvoření dostatečného vozového parku, který by umožňoval využívat elektromobily k uskladňování většího množství energie, by se však musel výrazně zvýšit dojezd těchto automobilů, klesnout jejich cena a daleko výrazněji se rozšířit infrastruktura. [67]

Existují i možnosti uložení elektrické energie do rotačních hmot, takzvaných setrvačnicků. Používají se i technologie stlačeného vzduchu, které fungují na podobném principu jako přečerpávací elektrárny, pouze s tím rozdílem, že čerpaným médiem je vzduch. Ovšem ani tyto technologie nedokážou uspokojit poptávku po uložení elektrické energie.

Aby mohlo být upuštěno od fosilních zdrojů paliva a na výrobě se mohly podílet pouze OZE, je zapotřebí objevit účinnou metodu uložení velkého objemu elektrické energie za ekologicky a ekonomicky přijatelných podmínek s dostatečnou účinností a možností dlouhodobé akumulace. Do té doby bude vždy zapotřebí, aby se s rozvojem OZE stále rozšiřovala kapacita záložního výkonu, která je dnes tvořena rychle startujícími elektrárnami, jako jsou třeba vodní nebo plynové. [22]

3.13 Podmínky připojení do distribuční a přenosové soustavy

Podmínky připojení výroben k distribuční soustavě se liší jednak výkonem připojovaného zdroje a také jeho typem. Podrobné informace jsou k nalezení v dokumentu Pravidla provozování distribuční soustavy (PPDS). Tento dokument vytvářejí subjekty podnikající v distribuci elektrické energie a je schvalován Energetickým regulačním úřadem. Jsou zde stanoveny požadavky na regulaci, ochrany, měřicí přístroje a jak se mají výrobny v síti chovat za určitých provozních podmínek. Je zde také určeno, jak budou vyhodnocovány zpětné vlivy na síť, podmínky pro připojení a také přehled a vzory potřebných formulářů.

Teoreticky je možné FVE připojit i přímo do přenosové soustavy. Dokument, který stanovuje podmínky připojení, se nazývá Kodex přenosové soustavy. Připojením FVE do soustavy se zabývá část IV, kapitola 7 „Pravidla pro připojování větrných a fotovoltaických elektráren do PS“. Oproti klasickým elektrárnám nemusí plnit některé požadavky, jako například od nich není vyžadována účast na primární, sekundární ani

terciární záloze. V ČR však žádné fotovoltaické elektrárny do přenosové soustavy připojené nejsou. [10][9]

Před samotným připojením výroby na síť, je potřeba jednotlivé požadavky konzultovat s odborníky a vycházet z platných PPDS. Na základě těchto poznatků poté vytvořit podklady pro plánování a rozhodování.

3.14 Možné vlivy na distribuční soustavu

Jak bylo zmíněno v předešlé kapitole, po připojení FVE do elektrizační soustavy začnou tyto dva systémy na sebe vzájemně působit. Je potřeba si uvědomit, že distribuční soustava byla, na rozdíl od přenosové soustavy, budována pro jednosměrný tok energie a to od výrobce ke spotřebiteli. Dnes může být spotřebitel zároveň i výrobce, což je pro distribuční soustavu stav, se kterým se při její výstavbě nepočítalo. OZE mohou mít na elektrizační soustavu některé vlivy podobné jako klasické elektrárny. Jedná se zejména o kolísání napětí při výpadku nebo naopak při neočekávané výrobě. Kolísání frekvence se týká již spíše větších výroben. Aby bylo významnější kolísání způsobeno fotovoltaickými systémy, muselo by se jednat o výpadek fotovoltaických elektráren ve větší oblasti v řádu desítek MW. S čím se také můžeme u FVE setkat, je produkce vyšších harmonických a to kvůli používání střídačů. Z důvodů rušení zařízení a elektromagnetické kompatibility je nutné tyto vyšší harmonické sledovat a filtrovat. [84][10]

Specifičnost fotovoltaických systémů spočívá v tom, že fotoelektrický jev probíhá neohledně na tom, jestli jsou nebo nejsou zapojeny do soustavy. Je tedy důležité, aby při poruše soustavy byla tato chyba bezpečně detekována a veškeré FVE byly odpojeny. Pokud by se tak nestalo, hrozilo by smrtelné nebezpečí pro všechny, kteří by na vedení chtěli pracovat, Ačkoliv by bylo z jedné strany odpojené, stále by bylo pod napětím. Rozpoznat poruchu sítě a odpojit systém, je úkol střídače nebo bezpečnostních systémů. Problém může nastat, pokud by v dané lokalitě bylo zapojeno více fotovoltaických systémů. V tom případě by se mohlo při poruše stát, že střídače by si vzájemně sloužily jako fiktivní síť a nedošlo by k odpojení. Tomuto jevu se říká ‚islanding‘ a střídač musí mít ochrany, který tento stav neumožní. [63][5]

4 Vytvoření matematického modelu FVE včetně zařízení k připojení elektrárny do distribuční soustavy vn pomocí softwaru MATLAB.

V této kapitole bude vytvořen model fotovoltaické elektrárny stojící na volném prostranství a připojené do distribuční soustavy vysokého napětí. Cílem tohoto modelu je zjistit průměrnou roční výrobu této fotovoltaické elektrárny a umožnit sledování elektrických veličin.

4.1 Zadání projektu fotovoltaické elektrárny

Jako modelový příklad jsem zvolil fotovoltaickou elektrárnu středního výkonu, připojenou do distribuční soustavy vn. Jedná se o 1 MW elektrárnu dodávající veškerou vyrobenou elektřinu do rozvodné sítě. Vstupní meteorologická data budou brána pro obec Nová Ves v okrese Mělník. Tato oblast byla zvolena z toho důvodu, že se zde nachází jedna z největších současných FVE o instalovaném výkonu 35,1 MW a to fotovoltaická elektrárna Vepřek. Modelován bude celý systém včetně přípojky do distribuční soustavy a i část přilehlé distribuční soustavy. Vstupními hodnotami budou hodnoty ozáření a teploty panelu, které budou stejné pro všechna fotovoltaická pole. Sledovány budou jak hodnoty pro stejnosměrnou část, tak hodnoty pro střídavou část.

4.2 Určení typů komponentů a jejich počtu

4.2.1 Fotovoltaické panely

Při výběru komponentů začneme fotovoltaickými panely. Zvolili jsme panel od firmy Sunpower, model SPR-435NE-WHT-D. [74] Jedná se o monokrystalický panel o výkonu 435 W s vysokou účinností 20,1 %. Jeho veškeré vlastnosti jsou k nalezení v datasheetu, který je přiložen jako Příloha 1. Vlastnosti, které nás zajímají, jsou zejména:

- Jmenovitý výkon P_{\max} : 435 W
- Napětí naprázdno U_{oc} : 85,6 V
- Proud nakrátko I_{sc} : 6,43 A
- U_{mpp} a I_{mpp} při STC: 72,9 V; 5,97 A
- Rozměry panelu: 2067×1046×54 mm
- Maximální napětí systému: UL – 600 V
- Teplotní koeficienty:
 - Výkonu (k_p): -0,38%/K
 - Proudů ($k_{I_{sc}}$): - 3,5 mA/K
 - Napětí ($k_{U_{oc}}$): -235,5 mV/K
- Maximální povolený proud modulu: 20A

Samozřejmě jsou důležité i ostatní parametry, jako je hmotnost nebo povolené pracovní teploty. Z hlediska dimenzování nás zatím tyto hodnoty zajímat nebudou.

Počet panelů

Nejprve je potřeba určit celkový počet panelů. To se zjistí velice snadno podělením celkového požadovaného výkonu výkonem jednoho panelu. [5]

$$Q_{FVPt} = \frac{P_{pož}}{P_{FVP}} = \frac{10^6}{435} = 2\,298,85 \text{ [ks]} \quad (12)$$

Tuto hodnotu zaokrouhlíme směrem nahoru. Aby se s počtem panelů dobře pracovalo dále, zvolil jsem 2 400 panelů. Toto číslo je dobře dělitelné a dává tudíž mnoho možností, do kolika polí tyto panely rozdělit. Skutečný instalovaný výkon bude:

$$P_{inst} = Q_{FVPs} \times P_{FVP} = 2400 \times 435 = 1044 \text{ [kW]} \quad (13)$$

Nyní tedy máme určený celkový výkon a počet panelů. Dále je potřeba určit velikost stringů, neboli počet panelů zapojených sériově, a rozhodnout o tom, zdali může být tento typ použit s daným střídačem.

Maximální napětí panelu

Na začátek je důležité zvolit minimální a maximální teploty okolí, které se mohou vyskytnout. Jako T_{min} bylo zvoleno $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, jako T_{max} $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Největší napětí, které může být na panelu naměřeno, bude při minimální teplotě, když bude obvod rozpojen. K výpočtu využijeme teplotní koeficient změny napětí.

$$U_{max} = U_{OC} + [k_{Uoc} \times (T_{min} - T_{STC})] = 85,6 + [-0,2355 \times (-10 - 25)] = 85,6 + 8,2425 = 93,8425 \text{ [V]} \quad (14)$$

Počet panelů ve stringu

Nejvyšší předpokládané napětí na panelu je 93,85 V. Maximální napětí celého systému nesmí překročit 600 V. Je tedy zřejmé, že jeden string může obsahovat maximálně 6 panelů.

Minimální provozní napětí

Minimální napětí nastane při maximální teplotě v průběhu dne, kdy může být panel zahřátý a jeho teplota může dosahovat až o 25°C více, než teplota okolí. Naše maximum bylo zvolené 40°C pro teplotu okolí a pro teplotu panelu $65\text{ }^{\circ}\text{C}$. Teplotní koeficient pro změnu pracovního napětí však není zadán. Je pouze zadán teplotní koeficient pro maximální výkon, který je udán v procentech. V kapitole 3.5.1 bylo ukázáno, že s rostoucí teplotou rapidně klesá napětí a proud roste minimálně. Využijme tedy aproximace, že P_{max} je v závislosti na teplotě přímo úměrné U_{mpp} . Potom lze tedy vypočítat minimální provozní napětí následovně:

$$k_{U_{mpp}} \approx k_{P_{max}} \times U_{mpp} = 0,0038 \times 72,9 \frac{\text{V}}{\text{K}} = 0,277 \frac{\text{V}}{\text{K}} \quad (15)$$

$$U_{pmin} = U_{MPP(STC)} - [k_{U_{mpp}} \times (T_{max} - T_{STC})] = 72,9 - [0,277 \times (65 - 25)] \text{ V} = 61,82 \text{ [V]} \quad (16)$$

Minimální provozní napětí určujeme kvůli spodní hranici vstupní hodnoty střídače. V mém modelu budu však mezi fotovoltaická pole a střídače řadit DC/DC měniče s MPPT, které

se budou snažit vstupní napětí pro střídač udržovat konstantní. Tato hodnota tedy musí korespondovat s minimální hodnotou vstupního napětí DC/DC měniče. [5]

Ochrana proti poruchovému proudu

Provozní proud jednoho stringu je stejný jako provozní proud panelu. Tedy zhruba 6 A. Maximální povolený proud panelu je 20 A. Platí, že v případě poruchy jednoho stringu nesmí součet proudů ostatních fungujících stringů překročit tuto povolenou hodnotu. V praxi to znamená, že pokud bude paralelně v jednom poli zařazeno více jak 5 a více stringů, musí být každý jištěn dodatečně.[5]

Velikost fotovoltaického pole

Po určení typu panelů, jejich počtu a délkám stringů je dalším krokem určení velikosti pole. Zvolil jsem, že jedno pole bude tvořeno 50 paralelně spojenými stringy o 6 panelech. Dohromady bude tedy 8 polí, každé o 300 panelech.

4.2.2 Výkonové měniče

DC/DC měniče

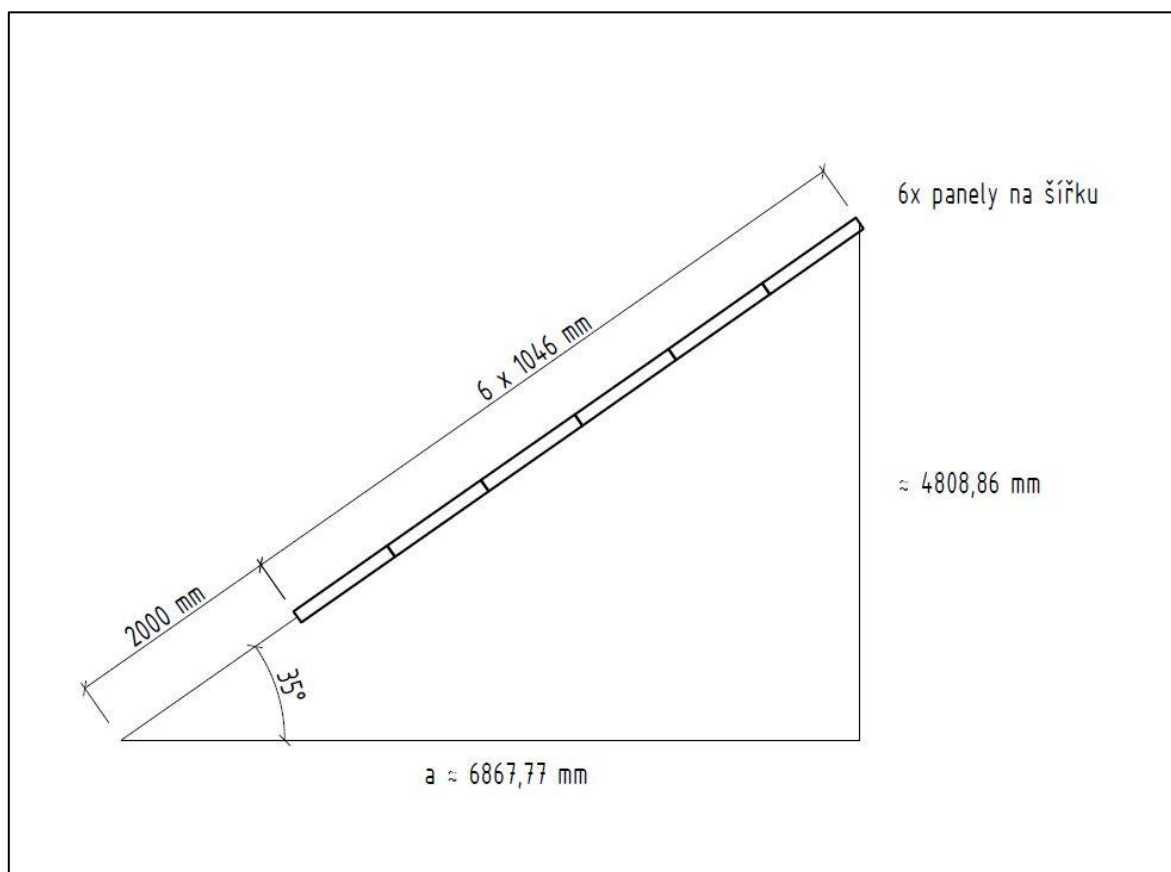
Ke každému poli je přiřazen jeden DC/DC měnič. Každý tento měnič obsahuje jeden MPPT a na jeho výstupu udržuje jmenovité vstupní napětí střídače. Tyto měniče tvoří dvě skupiny po 4, kde každá skupina je na výstupu paralelně propojená.

Střídače

Střídače byly zvoleny centrální, každý o maximálním výkonu 560 kW. Byl zvolen střídač SUNNY CENTRAL 500CP XT od firmy SMA [65]. Jeho jmenovité vstupní napětí je 430 V. Jmenovité výstupní napětí je 270 V. Část datasheetu tohoto střídače je přiložena jako Příloha 2.

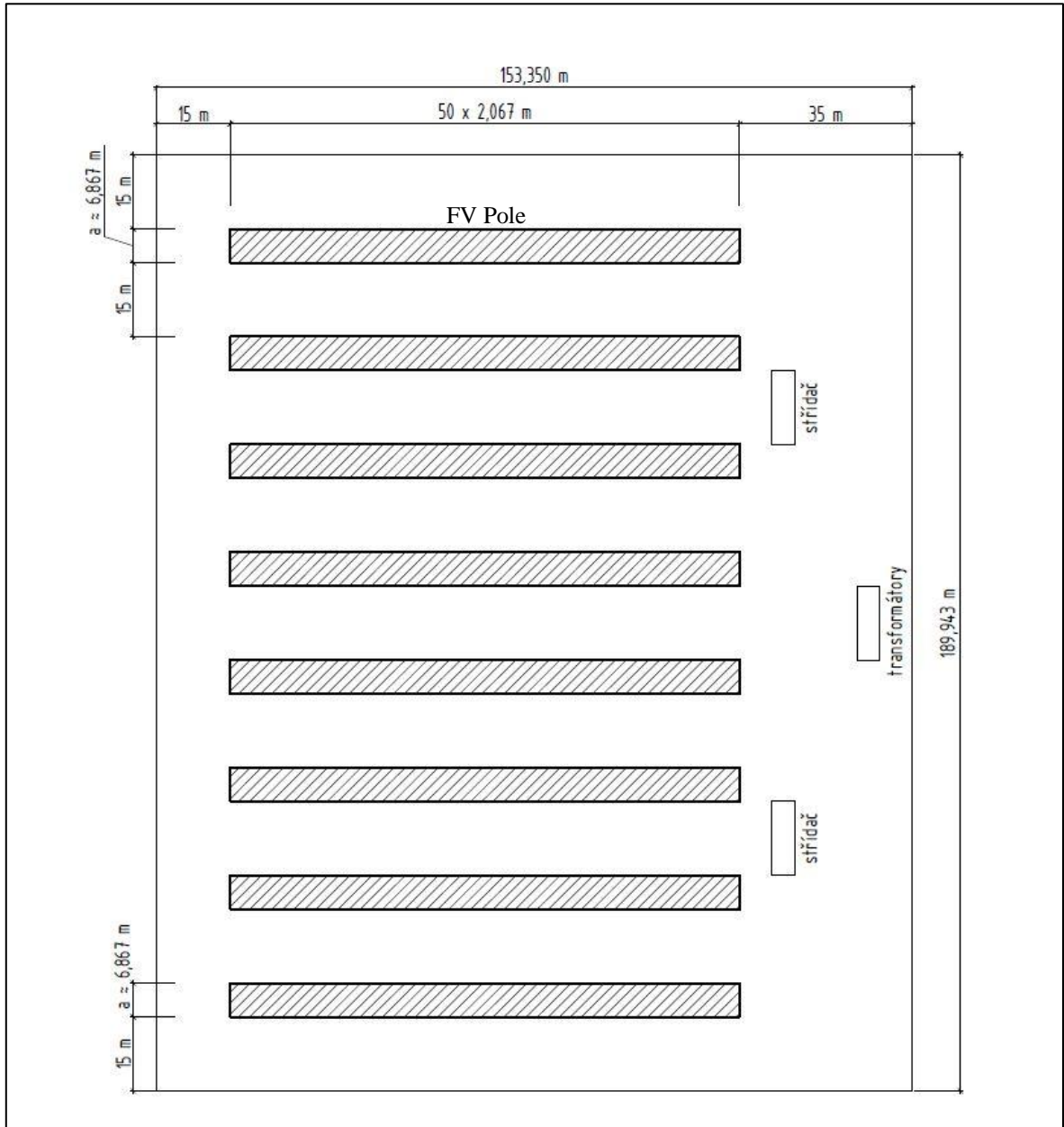
4.2.3 Nosné konstrukce

Nosné konstrukce jsou zpravidla vyráběny z hliníkových rámců a je možné je nechat vyrobit na zakázku dle potřeby zákazníka. Ideální sklon od vodorovné plochy činí v našich podmínkách zhruba 35° . Jelikož jeden string tvoří 6 panelů, rozhodli jsme se tyto panely seřadit v jedné řadě nad sebe, kdy se vzájemně dotýkají delší hranou. Rozložení na šířku nemá na normální provoz vliv. Problém by mohl být při horizontálním stínění, kdy by úbytek výkonu byl větší než při orientaci na výšku a tím by byl přetěžován. Mezi jednotlivými řadami konstrukcí jsme však zvolili dostatečnou vzdálenost, tudíž by k stínění nemělo docházet. Od nejnižšího panelu je ještě zhruba 2 m dlouhý volný prostor. První panel je tedy zhruba v metrové výšce nad zemí, kvůli porostu, vlhku, sněhu a případně zvěři. Profil této nosné konstrukce ukazuje Obrázek 14. Na jednu konstrukci umístíme vždy 2 řady panelů. Těchto konstrukcí bude v jednom poli 25, dohromady tedy 200 pro celou elektrárnu.



Obrázek 14: Profil nosné konstrukce

Mezi jednotlivými řadami panelů byl ponechán volný pruh o šířce 15 m, což je zhruba trojnásobek výšky konstrukce. Tento pruh by mohl být menší, kdyby elektrárna byla postavena ve svahu. V tom případě by se však mohla prodražit montáž a případně i později výdaje na údržbu. Rozložení celé fotovoltaické elektrárny zobrazuje Obrázek 15.



Obrázek 15: Navržený půdorys fotovoltaické elektrárny

4.2.4 Kabely

Kabely rozlišujeme v rámci fotovoltaické elektrárny dvoje. Stejnoseměrné a střídavé. Více bude potřeba kabelů stejnosměrných. Aby bylo ušetřeno jejich množství a aby mohly být pojistky řetězců uloženy pohromadě, rozhodl jsem se na každé pole použít 2 slučovače, kde v každém je sloučeno 25 stringů. Pokud každý slučovač umístíme 25 m od kraje pole, bude potřebná délka kabelů na spojení jednoho pole do slučovačů:

$$l_{sskpole} = 24 \times 12,5 \times 2 \times 2 \text{ [m]} \quad (16)$$

(počet řetězců bez jednoho, který je přímo u slučovače \times průměrná vzdálenost k slučovači \times 2 slučovače na pole \times kladný a záporný kabel). Vyvedení slučovačů k okraji pole přidá dalších $2 \times (25+75)$ m. Dohromady pro všechna pole 8×1400 m. Na vývody ke střídačům je potřeba zhruba dalších 400 m kabelů. Dohromady tedy 11600 m.

Kabely střídavé se nacházejí pouze mezi střídačem-transformátorem a sítí. Potřebná délka kabelů byla odhadnuta na 400 m kabelů.

4.2.5 Transformátory

Za transformátory jsem zvolil dva stejné transformátory o jmenovitém výkonu 550 kVA. Transformátory tohoto výkonu jsou běžně vyráběny v sériové výrobě. Pořizovací cena dvou transformátorů je sice o něco větší než pořizovací cena jednoho většího, ale toto uspořádání dává možnost v případě poruchy jednoho transformátoru nebo střídače dodávat do sítě alespoň poloviční výkon.

4.2.6 Ostatní prvky

Mezi ostatní prvky řadíme oplocení okolo areálu, který má obvod zhruba 700 m, dále pak měřicí a monitorovací prvky, ochranné prvky, zařízení pro připojení do distribuční soustavy a jiné. Tyto komponenty již tvoří jen zanedbatelnou část investice, takže se o nich nebudu více rozepisovat.

4.3 Vlastní program v matematickém softwaru MATLAB Simulink

4.3.1 Popis matematického softwaru

Model byl vytvořen v matematickém softwaru MATLAB Simulink od firmy MathWorks. Používaná verze byla MATLAB R2015b, která je volně k dispozici pro studijní účely studentům ČVUT. Tento software umožňuje grafické znázornění fyzikálního systému pomocí bloků, kterým se nastavují jednotlivé parametry. Pro naše účely byla nejvíce používána knihovna Simscape Power Systems (dříve SimPower Systems). [46]

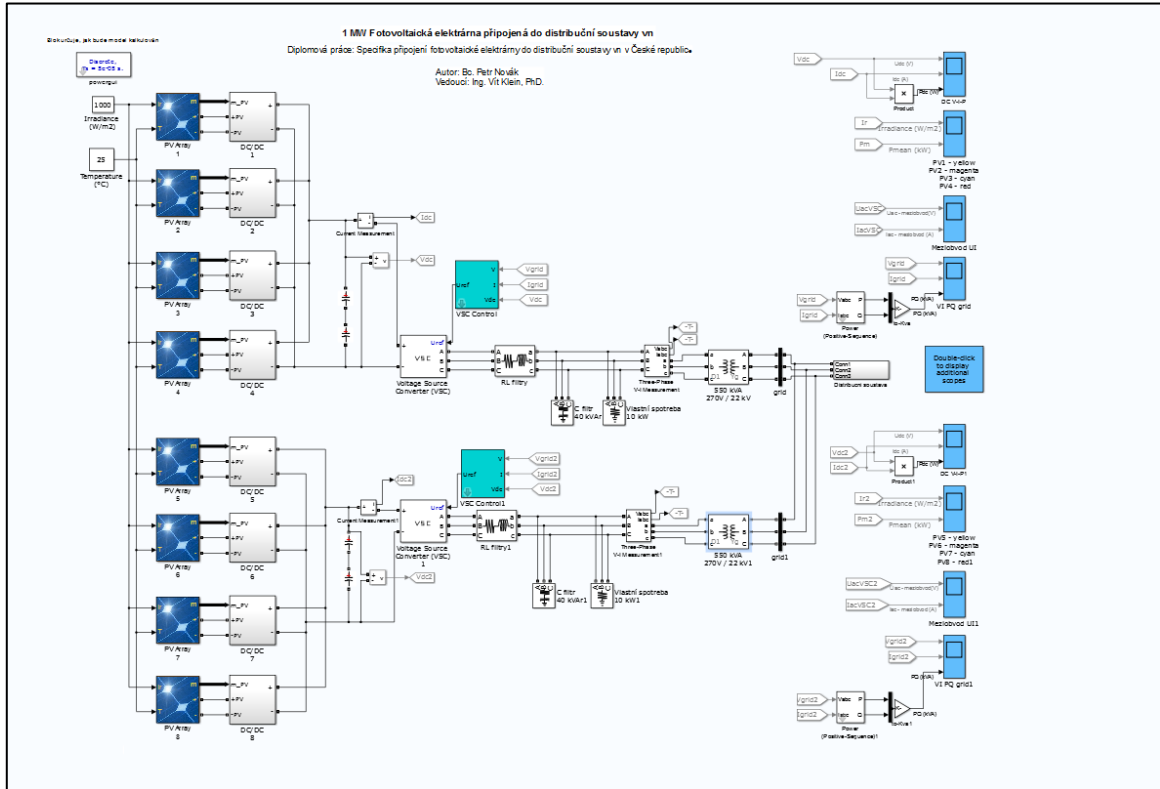
4.3.2 Cíl matematického modelu

Matematický model vytvářím proto, abych určil množství vyrobené elektřiny mnou navrhované elektrárny. Pomocí tohoto modelu určím, jaký bude aktuální výkon za daných podmínek. Jako vstupní hodnoty slouží pouze hodnota ozáření I (W/m^2) a teplota panelů T ($^\circ\text{C}$). Tyto hodnoty jsou stejné pro všechna pole, neboť u tohoto systému neočekávám rozdílné podmínky.

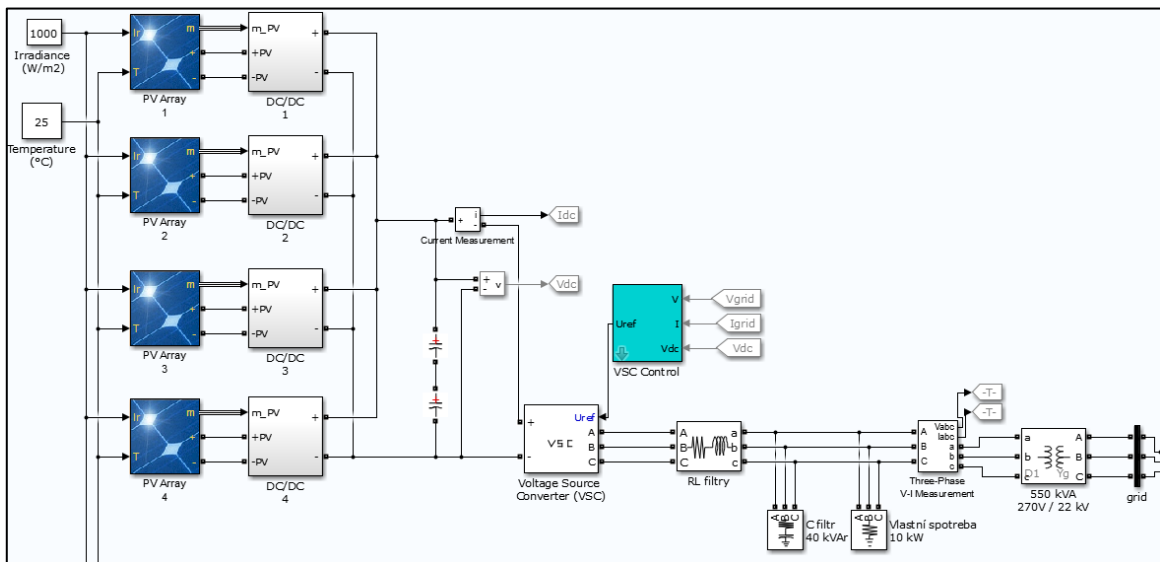
Dál tento model také dovoluje detailněji pozorovat proudy, napětí a výkony v jednotlivých částech modelu, reakční dobu MPPT, výkony jednotlivých polí a další. Pro každý měsíc bude nalezen průměrný výkon za daných podmínek a na základě znalosti hodnot dopadající energie na m^2 spočítána celková výroba systému.

4.3.3 Popis jednotlivých částí modelu

System se skládá ze dvou identických celků, kde každý má jmenovitý výkon 522 kW. Pokud tedy budu popisovat jednu konkrétní část v daném celku, platí totéž i o části v celku druhém. Celý model ukazují Obrázek 16 a jeden funkční celek Obrázek 17.



Obrázek 16: Matematický model fotovoltaické elektrárny

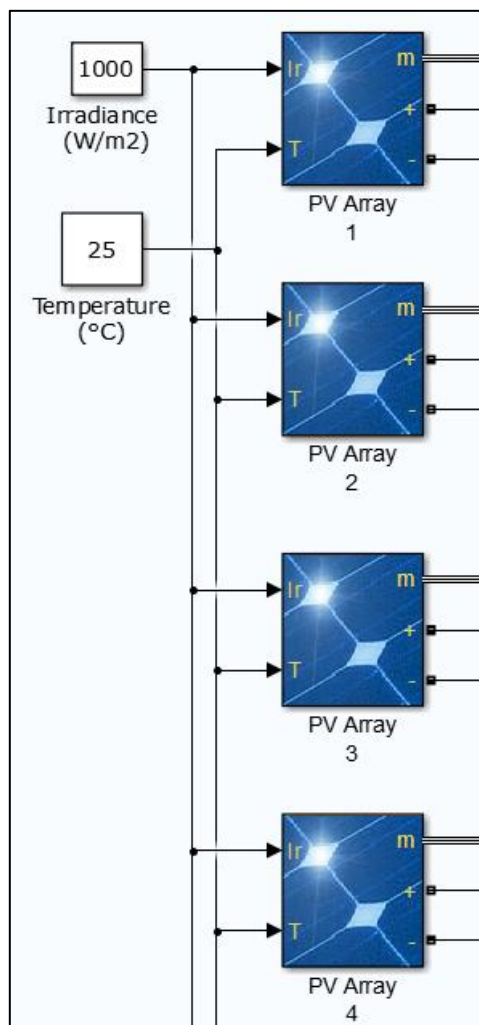


Obrázek 17: Funkční celek fotovoltaické elektrárny

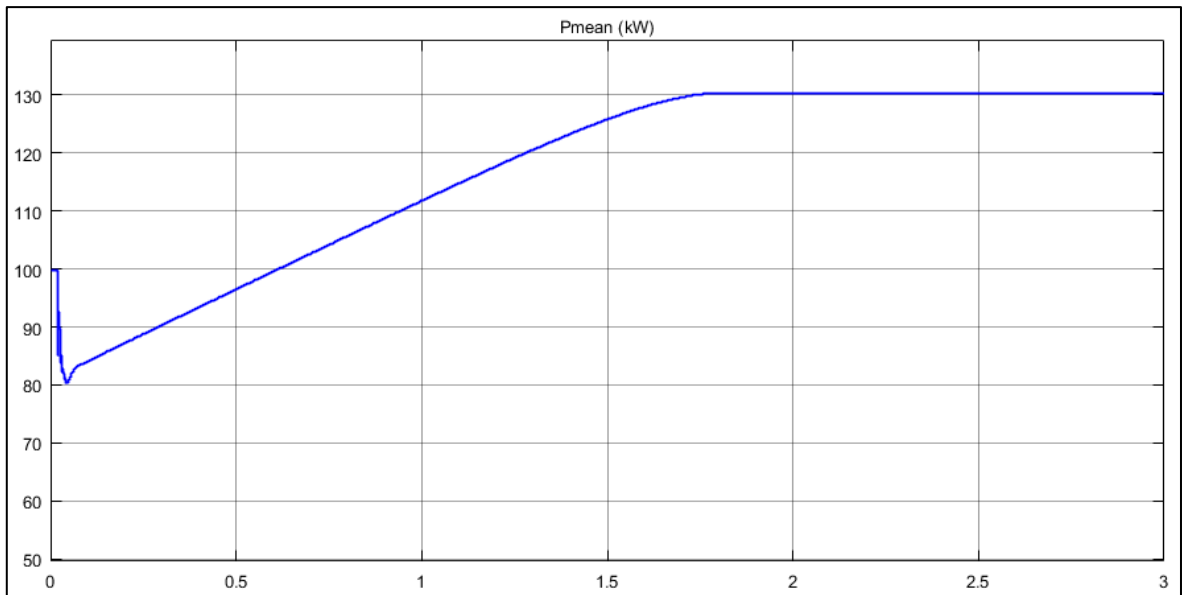
Každý celek se dá dělit na několik částí.

Fotovoltaická pole

Fotovoltaická pole (Obrázek 18) jsou základním stavebním kamenem fotovoltaické elektrárny. V programu MATLAB Simulink se nachází přímo funkční blok PV array, který obsahuje rozsáhlou databázi fotovoltaických panelů dostupných na trhu i s jejich nejdůležitějšími vlastnostmi. Dále se v tomto bloku určí, kolik je modulů zapojených sériově do řetězce a kolik je těchto řetězců spojených paralelně. Zbytek hodnot se již doplní z databáze (viz Obrázek 20). Po spuštění modelu je možno pozorovat výkon jednotlivých polí. Na začátku modelace došlo ke krátkému přechodnému jevu a poté je vidět nárůst až na 130 kW, jak ukazuje Obrázek 19 pro fotovoltaické pole PV1. Výkony ostatních polí jsou identické.



Obrázek 18: Část modelu s fotovoltaickými poli



Obrázek 19: Dodávaný výkon jedním polem

Block Parameters: PV Array 1

PV array (mask) (link)
 Implements a PV array built of strings of PV modules connected in parallel. Each string consists of modules connected in series.
 Allows modeling of a variety of preset PV modules available from NREL System Advisor Model (Jan. 2014) as well as user-defined PV module.

Input 1 = Sun irradiance, in W/m², and input 2 = Cell temperature, in deg.C.

Parameters **Advanced**

Array data

Parallel strings: 50
 Series-connected modules per string: 6

Module data

Module: SunPower SPR-435NE-WHT-D
 Plot I-V and P-V characteristics when a module is selected

Maximum Power (W): 435.213	Cells per module (Ncell): 128
Open circuit voltage Voc (V): 85.6	Short-circuit current Isc (A): 6.43
Voltage at maximum power point Vmp (V): 72.9	Current at maximum power point Imp (A): 5.97
Temperature coefficient of Voc (%/deg.C): -0.326	Temperature coefficient of Isc (%/deg.C): 0.0193

Model parameters

Light-generated current IL (A): 6.436
 Diode saturation current I0 (A): 5.8526e-11
 Diode ideality factor: 1.0252
 Shunt resistance Rsh (ohms): 395.6428
 Series resistance Rs (ohms): 0.36845

Display I-V and P-V characteristics of ...
 array @ 1000 W/m² & specified temperatures
 T_cell (deg. C) [45 25]
 Plot

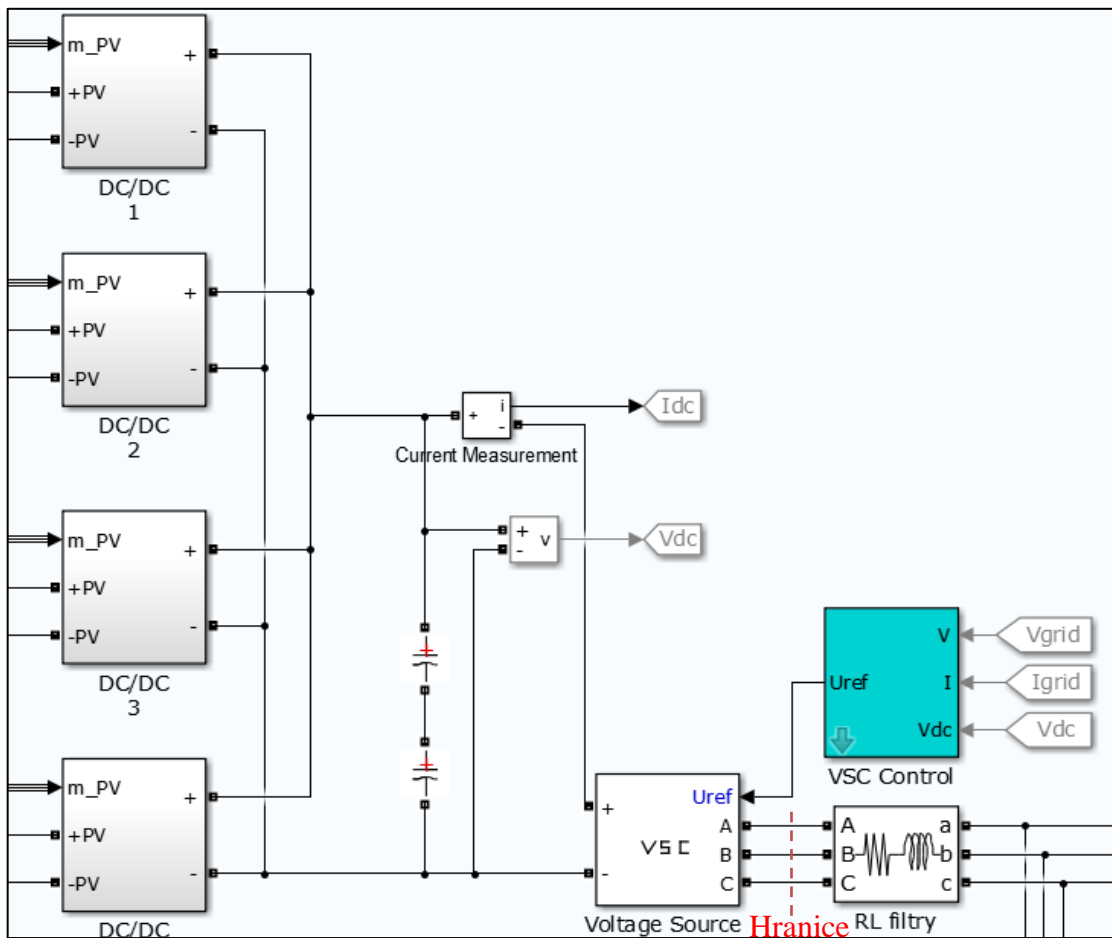
OK Cancel Help Apply

Obrázek 20: Zadané hodnoty pro jedno fotovoltaické pole

4.3.4 Měníče

Bloky DC/DC měniče a VSC (Voltage Source Control), který zde slouží jako střídač, byly převzaty z modelu „400-kW Grid-Connected PV Farm (Average Model)“ [45], který je součástí knihoven programu MATLAB Simulink. Tyto bloky reprezentuje Obrázek 21. Tento měnič používá ke stanovení MPP metodu Perturb and Observe. V češtině bychom řekli: změň a pozoruj. Metoda je velice jednoduchá. Měníč změní o zadaný krok hodnotu napětí a pozoruje výkon. Pokud se výkon zvýšil, změní opětovně hodnotu napětí stejným

směrem. Pokud se naopak výkon zmenšil, vrátí se napětí na původní hodnotu a další výchylka je opačným směrem než byl tento.

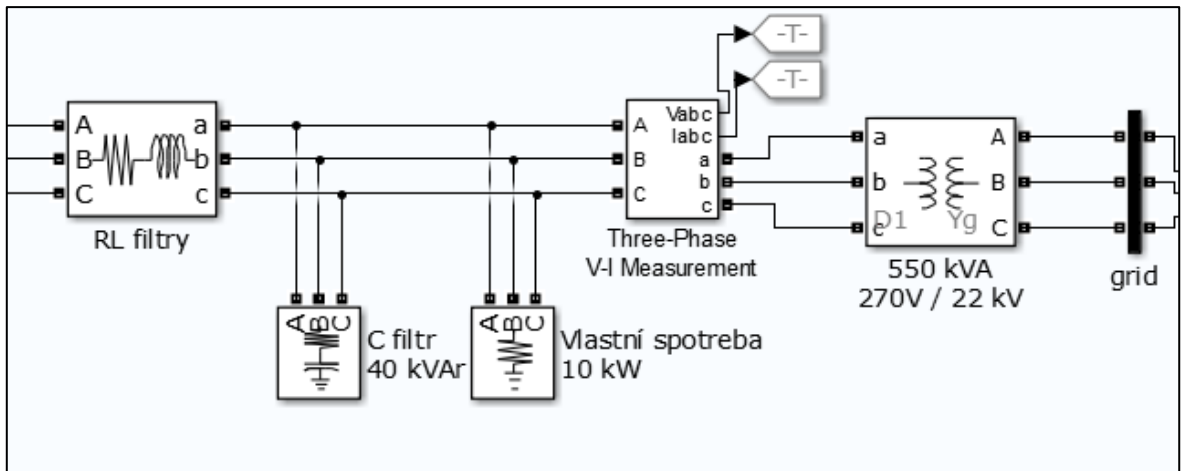


Obrázek 21: Část modelu s měniči

Vše je řízeno blokem VSC Control, do kterého jsou vloženy vstupní parametry. Důležitou vlastností MPPT je rychlost regulace a schopnost najít MPP. V našem případě byla tato doba do ustálení maxima výkonu zhruba 2 sekundy (viz Obrázek 19), což je v běžném provozu zcela dostačující. Při osvětlení 1000 W/m^2 a teplotě $25 \text{ }^\circ\text{C}$ byl aktuální výkon 133 kW , což odpovídá jmenovitému výkonu všech panelů v poli po odečtení vlastní spotřeby a ztrát.

4.3.5 Meziobvod

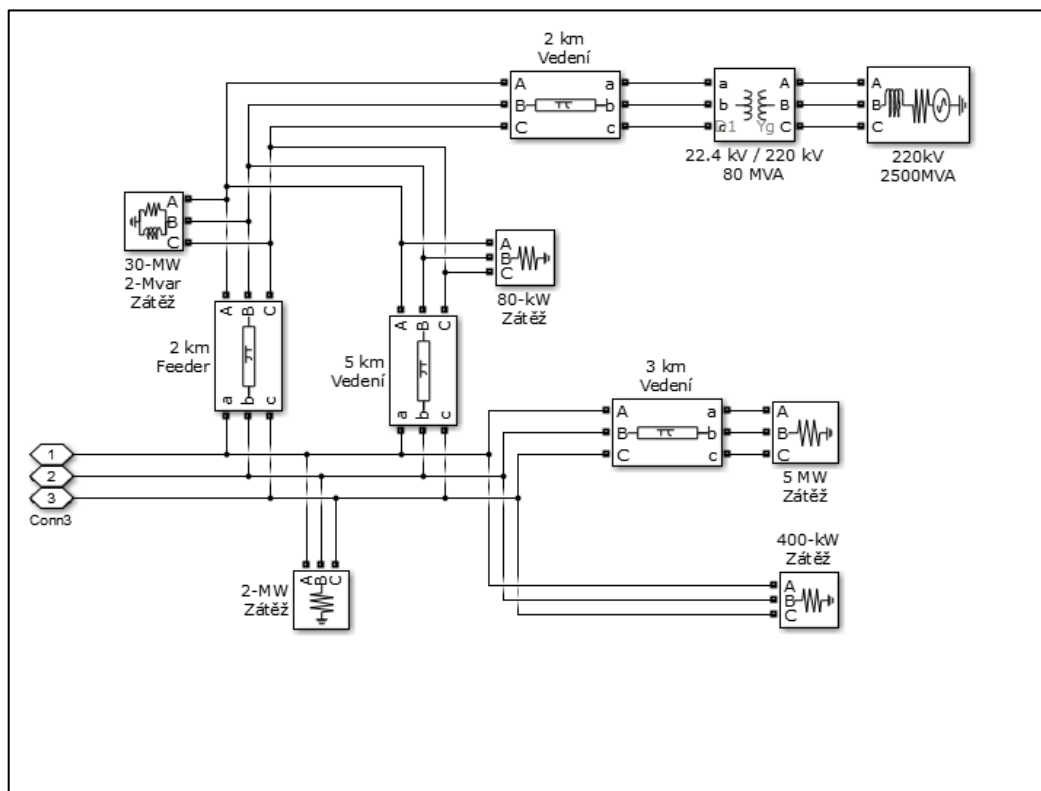
Meziobvodem mezi střídačem a transformátorem protéká relativně velký proud o nízkém napětí 270 V . V meziobvodu jsou také umístěny filtry pro odstranění vyšších harmonických složek, které produkují střídače. Z tohoto meziobvodu je také realizován odběr vlastní spotřeby elektrárny. Meziobvod ukazuje Obrázek 22.



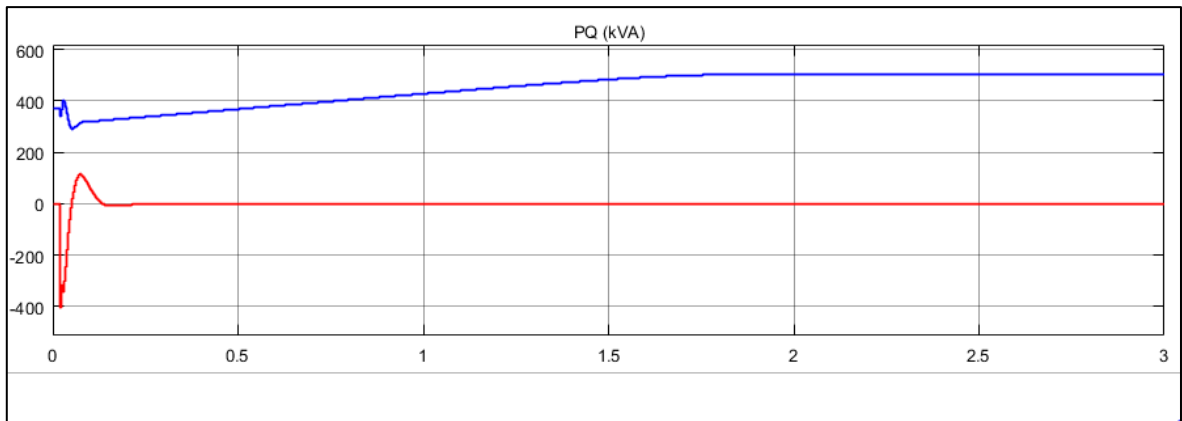
Obrázek 22: Část modelu s meziobvodem

4.3.6 Distribuční soustava

Transformátory jsou na výstupech spojeny paralelně a dodávají energii do distribuční soustavy. Obrázek 23 je detailní schéma distribuční soustavy po rozkliknutí subsystému. Jelikož tento model neřeší dynamické jevy ani zpětné působení fotovoltaické elektrárny na soustavu, nejsou kladeny na tuto soustavu žádné speciální požadavky. V našem případě jsme zvolili distribuční soustavu s několika odběry, s několikakilometrovými vedeními a s přechodem do přenosové soustavy 220 kV. Nejvíce nás zajímá výkon dodávaný do soustavy za daných podmínek. Činný a jalový výkon dodávaný do soustavy od jednoho celku ukazuje Obrázek 24.



Obrázek 23: Schéma distribuční soustavy



Obrázek 24: Dodávané výkony jedním celkem. Červená (Q), Modrá (P)

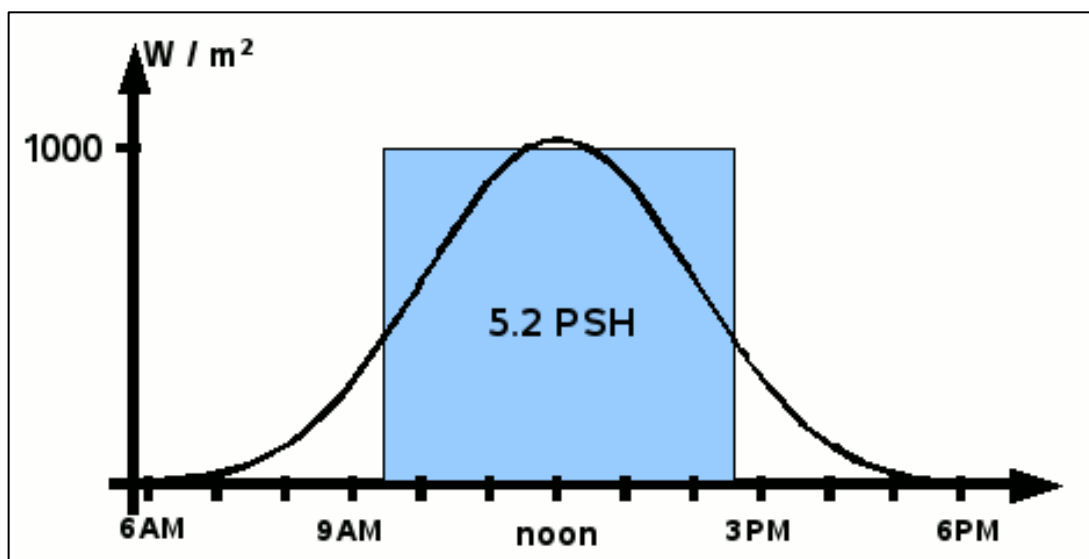
Průběhy elektrických veličin v jednotlivých částech modelu jsou přiloženy v příloze.

4.4 Výsledky matematického modelu

4.4.1 Výpočty

Hlavním smyslem tohoto modelu je získat přehled o dodávaném množství energie do sítě a na základě toho stanovit výnosy fotovoltaické elektrárny. Abychom mohli tato data získat, je potřeba do modelu zadat správné hodnoty.

Hodnota ozáření se v průběhu dne mění v závislosti na poloze slunce na obloze. Pokud bychom vynesli závislost ozáření 1 m^2 na čas, měla by tato křivka pro jeden den tvar podobný Gaussově křivce. Plocha pod křivkou by poté symbolizovala množství dopadající energie. V praxi se však setkáváme s použitím tzv. Peak sun hour (PSH), v češtině bychom tento ukazatel mohli nazvat doba slunečního maxima. Tato hodnota nám vyjadřuje, jak dlouho by muselo Slunce svítit o konstantním výkonu, aby dopadlo stejné množství energie za celý den, vztaheno na 1 m^2 . Grafické znázornění ukazuje Obrázek 25.



Obrázek 25 : Znázornění doby slunečního maxima [68]

V mém modelu budu tohoto zjednodušení užívat taky, neboť hodnoty celkové dopadající energie jsou známé.

Teplota panelů závisí na několika faktorech. Kromě okolní teploty, rychlosti větru a hodnoty ozáření také na konstrukčním řešení. Tepelný model mého systému nebyl vytvořen a tak je nutné vycházet z aproximací.

Průměrné měsíční teploty byly převzaty ze serveru Current Results³¹. Byly brány hodnoty pro Prahu s indexem 'High', neboť nás zajímají jenom teploty přes den.

Dále bylo potřeba zjistit hodnotu ozáření. Ta závisí na koeficientu atmosférické masy, jež se mění v závislosti na poloze slunce. Poloha Slunce nad obzorem byla brána vždy 14. den v daném měsíci v pravé poledne. Byla použita online kalkulačka na stránkách Stavebnictví3000.cz³². Hodnota se ale dá stanovit i pomocí následujícího vzorce:

$$\alpha_s = \sin^{-1}[\sin \delta \times \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos(15^\circ(LST - 12))][^\circ] \quad (17)$$

Kde α_s = úhel Slunce nad obzorem, δ = je úhel deklinace, φ = zeměpisná šířka, LST = Místní solární čas (Local Solar Time)

Úhel od zenitu (θ) je poté doplněk α_s do 90° . Koeficient vzdušné masy se poté spočítá (se zanedbáním zaoblení atmosféry) podle vzorce[58]:

$$AM = \frac{1}{\cos \theta} [-] \quad (18)$$

Celková hodnota ozáření na úrovni moře se spočítá podle vzorce [58]:

$$I_G = 1,1 I_D = (1,1 \times 1,353 \times 0,7^{AM^{0,678}}) \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (19)$$

Kde I_G je hodnota celkového ozáření a I_D hodnota přímého ozáření. Já tuto hodnotu počítám pro jasnou oblohu v pravé poledne daného dne.

Ustálená teplota fotovoltaického článku se dá vyjádřit podle následujícího vzorce[59]:

$$T_{\text{článek}} = (T_{\text{vzd}} + \frac{NOCT-20}{80} * I_{\text{článek}}) [^\circ C] \quad (20)$$

Kde NOCT je Normal Operating Cell Temperature (normální provozní teplota článku), která bývá uvedena v datasheetu, T_{vzd} je teplota okolí v $^\circ C$ a $I_{\text{článek}}$ je ozáření článku v mW/cm^2 . Vypočtená teplota článku je pro ustálené hodnoty, v praxi průměrná hodnota panelu této hodnoty nedosáhne, neboť přes den se panel nestihne tak rychle ohřát a přes noc vychladne. Mezi ustálenou teplotou článku a průměrnou měsíční teplotou okolí byl určen rozdíl. Tento rozdíl byl vynásoben koeficientem, který odpovídá procentuální části doby slunečního svitu z celého dne a následně připočten k průměrné měsíční teplotě.

Toto určení střední teploty panelu je sice zjednodušené, ale pro potřeby vytvoření matematického modelu dostačující. Na detailnější hodnoty by bylo potřeba výsledky měření přímo na místě stavby, které bohužel nejsou k dispozici.

³¹ Current Results: weather and science facts. *Weather Averages for European Cities* [online]. Smithers BC: Current Results Publishing [cit. 2017-01-02]. Dostupné z: <https://www.currentresults.com/Weather/Europe/Cities/average-european-city-weather.php>

³² Stavebnictví3000.cz. *Úhel dopadu slunečních paprsků na vodorovnou rovinu, střechu a fasádu* [online]. Vega [cit. 2017-01-02]. Dostupné z: <http://www.stavebnictvi3000.cz/vypocty/3-uhel-dopadu-slunecnich-paprsku-na-vodorovnou/?do=calcForm-submit>

Nyní již mohu zadat vstupní hodnoty do matematického modelu. Zadávám hodnoty pro každý měsíc zvlášť a dostávám tak 12 hodnot průměrného měsíčního výkonu.

V matematickém modelu jsou již některé ztráty započítané. Jedná se o ztráty způsobené rozdílem teploty od STC a ztráty transformátorů. Ostatní nezapočítané ztráty ukazuje Tabulka 6. V té je vidět, že účinnost celého systému bez započítání ztrát transformátoru a panelů je odhadnuta na 86 %.

Systémové ztráty			
Důvod ztráty	Procentní ztráty	Účinnost	Poznámka
Nečistoty + usazeniny	3%	0,97	
Tolerance výrobcem panelu	5%	0,95	Z datasheetu
Ztráty v DC/DC konvertoru	3%	0,97	
Stínění	0%	1	Ideální konstrukce
Orientace a úhel naklonění	0%	1	Ideální konstrukce
Napěťový úbytek	2%	0,98	Na kabelech
Účinnost střídače	2%	0,98	Z datasheetu
Účinnost transformátoru	0%	1	Započtena v modelu
Teplotní rozdíly	0%	1	Započteno v modelu
Celkem	14%	0,858458	

Tabulka 6: Systémové ztráty

Data pro průměrné hodnoty dopadající energie byla převzata z výpočtového softwaru PVGIS³³ pro naši polohu a na plochu se sklonem 35°. Při konstantním osvětlení 1000 W odpovídá tato hodnota také době slunečního maxima. Z těchto hodnot pak byla vypočítána celková produkce elektřiny v jednotlivých měsících. Součtem všech hodnot pro dané měsíce vyšlo, že celková hodnota vyrobené elektřiny za rok je 1070 MWh. Veškeré zapsané hodnoty ukazuje Tabulka 7.

³³ European Commission: Joint research centre. *Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS)* [online]. Ispra, 2012 [cit. 2017-01-02]. Dostupné z: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/index.htm>

	Výpočet vyrobené elektřiny pomocí matematického modelu											
Měsíc	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Počet dní v měsíci	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
Průměrný úhel slunce nad obzorem v 12:00[°]	18,7	26,3	36,7	49	58,5	63,3	61,6	54	42,6	30,7	21	16,5
Úhel od zenitu [°]	71,3	63,7	53,3	41	31,5	26,7	28,4	36	47,4	59,3	69	73,5
Koeficient vzdušné hmotnosti (AM) [-]	3,12	2,25	1,67	1,33	1,17	1,12	1,14	1,24	1,48	1,96	2,79	3,5
Max. dopadající záření - celkové [W/m ²]	688,1	802,1	898,3	965,5	1000,9	1012,6	1007,8	985,1	934,6	847,7	728	646,4
Průměrná teplota [°C]	0	3	8	13	18	21	23	23	19	13	6	2
Max ustálená teplota panelu [°C]	21,5	28,06	36,06	43,15	49,53	52,64	54,5	53,78	48,19	39,46	28,75	22,2
Přírůstek teploty panelu [°C]	21,5	25,06	28,06	30,15	31,53	31,64	31,5	30,78	29,19	26,46	22,75	20,2
Koeficient přírůstku teploty[-]	0,39	0,44	0,50	0,56	0,61	0,67	0,61	0,56	0,50	0,44	0,39	0,33
Průměrná teplota panelu v daném období [°C]	8,4	14,1	22,0	29,8	37,3	42,1	42,3	40,1	33,6	24,8	14,8	8,7
Psystému (MATLAB) [kW]	1067	1054	1023	991	961	941,2	940,4	950	976	1012	1051	1066
Nezapočítané systémové ztráty (koeficient) [-]	0,858	0,858	0,858	0,858	0,858	0,858	0,858	0,858	0,858	0,858	0,858	0,858
Průměrná denní dopadající energie [kWh/m ²]	1,12	2,08	3,64	5,08	5,28	5,48	5,29	4,97	3,95	2,59	1,34	0,92
Průměrná měsíční dopadající energie [kWh/m ²]	34,72	58,24	112,84	152,4	163,68	164,4	163,99	154,07	118,5	80,29	40,2	28,52
Produkce elektřiny [MWh]	31,81	52,7	99,096	129,65	135,03	132,83	132,39	125,65	99,29	69,75	36,27	26,1
Celková roční produkce elektřiny [MWh]	1070,6											

Tabulka 7: Výpočtová tabulka pro určení množství vyrobené elektřiny

4.4.2 Porovnání s online nástrojem PVGIS

System jsem také vyzkoušel zadat do výpočtového online nástroje PVGIS³⁴. Obrázek 26 ukazuje výsledné hodnoty z tohoto nástroje. V porovnání s mým modelem vidíme, že energetický zisk je vyšší z našeho matematického modelu. To se dalo očekávat, neboť jsou použity monokrystalické panely s vyšší účinností, kdežto nástroj PVGIS pracuje s polykrystalickými panely. Nicméně hodnoty vyšly velmi podobné a tudíž lze tento model považovat za reálný a jeho výsledky budu používat v dalších výpočtech v ekonomickém modelu.

³⁴ European Commission: Joint research centre. *Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS)* [online]. Ispra, 2012 [cit. 2017-01-02]. Dostupné z: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/index.htm>

Fixed system: inclination=35°, orientation=0°				
Month	E_d	E_m	H_d	H_m
Jan	976.00	30300	1.12	34.6
Feb	1800.00	50400	2.08	58.4
Mar	3050.00	94700	3.64	113
Apr	4090.00	123000	5.08	153
May	4120.00	128000	5.28	164
Jun	4220.00	127000	5.48	164
Jul	4040.00	125000	5.29	164
Aug	3830.00	119000	4.97	154
Sep	3150.00	94400	3.95	119
Oct	2140.00	66200	2.59	80.2
Nov	1140.00	34200	1.34	40.3
Dec	803.00	24900	0.92	28.6
Yearly average	2780	84700	3.49	106
Total for year	1020000		1270	

E_d : Average daily electricity production from the given system (kWh)
 E_m : Average monthly electricity production from the given system (kWh)
 H_d : Average daily sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m²)
 H_m : Average sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m²)

Obrázek 26: Výsledky z výpočtového programu PVGIS

4.4.3 Zhodnocení

Cílem této kapitoly bylo vytvoření matematického modelu zvolené elektrárny, který bude schopný stanovit aktuální výkon dodávaný do sítě na základě vstupních hodnot. Po zadání vypočtených vstupních hodnot charakteristických pro jednotlivé měsíce jsem zjistil průměrný výkon v jednotlivých měsících a ten pak vynásobil počtem hodin slunečního maxima. Tím jsem získal hodnotu dodané energie do sítě za předpokladu, že síť je schopna pojmout 100 % dodávky elektřiny. To by za normálních provozních podmínek neměl být problém. Porovnáním výsledné hodnoty s výpočtovým online nástrojem jsem zjistil, že vypočtená hodnota pomocí matematického modelu se od hodnoty vypočtené nástrojem PVGIS liší pouze o 5 %, což může být způsobeno použitím lepších panelů. Matematický model lze tedy prohlásit za věrohodný.

5 Analýza ekonomické efektivity FVE za dobu jejího celého životního cyklu v podmínkách České republiky

Cílem této kapitoly je popsat funkci univerzálního nástroje na výpočet ekonomičnosti provozu FVE. Pomocí něho ukázat na modelovém příkladu fotovoltaické elektrárny, jejíž model byl vytvořen v předešlé kapitole, ekonomičnost tohoto projektu. O tom, zdali bude jakýkoliv projekt nakonec realizován, rozhodují právě nejčastěji ekonomické aspekty. Tento model si klade za cíl přehledně zmapovat finanční toky v rámci celého životního cyklu projektu. Jedná se pouze o modelový příklad, který slouží pro ilustraci. V případě zájmu stavět skutečnou elektrárnu je potřeba vše důkladně probrat se zhotovitelem projektu, neboť každý takovýto projekt se staví na klíč. Také je potřeba vždy dodržovat platné zákony a normy.

Tento projekt budu hodnotit z hlediska cash flow. Nejdůležitějším krokem je tedy zjistit náklady a výnosy v jednotlivých letech.

5.1 Určení nákladů

Z hlediska finančních toků můžeme rozdělit náklady do dvou kategorií. Na náklady investiční a na náklady provozní.

5.1.1 Investiční náklady

Mezi investiční náklady řadíme veškeré náklady, které je bezpodmínečně nutné vyložit před uvedením projektu do provozu. Tyto náklady se poté mohou dělit do jednotlivých kategorií.

Náklady instalační – do této skupiny řadíme veškeré náklady, které jsou spojené s připojením elektrárny do sítě. Jedná se zejména o přípojku, případně další dodatečné stavby, a nutné měřicí a bezpečnostní systémy.

Náklady projektové – mezi projektové náklady patří veškeré administrativní, konzultační a poradenské služby. Také sem řadíme veškeré náklady na vypracování projektů a analýz.

Náklady pořizovací – všechny náklady na technologická zařízení a veškeré potřebné komponenty se započítávají do pořizovacích nákladů. U fotovoltaických systémů je právě tato kategorie tou největší. Největšími položkami jsou zde samotné panely a střídače.

Jiné investiční náklady – v této kategorii se nacházejí veškeré ostatní investiční náklady, které se do ostatních kategorií nezařazují. Jako příklad lze uvést zaškolení personálu.

Investiční majetek také bývá předmětem daňových odpisů. O odpisech bude pojednáno v následujících kapitolách podrobněji.

5.1.2 Provozní náklady

Provozní náklady jsou již spojené se samostatným provozem zařízení. V našem modelu vyhodnocujeme provozní náklady v rámci každého roku zvlášť. Tyto náklady lze opětovně dělit dle několika hledisek.

Náklady na opravu a údržbu – tyto náklady budou tvořit v provozních nákladech nejvýznamnější položku. Jedná se o náklady spojené s opravami a výměnou vadných komponent, náklady na diagnostiku a revize a výdaje na údržbu pozemku. Výdaje spojené s výměnou komponentů s kratší dobou životnosti než je délka životního cyklu tohoto projektu jsou brány jako provozní a ne jako investiční. Je to z toho důvodu, že fotovoltaické panely a střídače mají dobu životnosti shodnou nebo delší v porovnání s dobou životnosti tohoto projektu a tím pádem jsou tyto náklady v porovnání s prvotními investičními náklady pouze několikaprocentní.

Náklady osobní – tyto náklady tvoří v rámci provozu fotovoltaické elektrárny pouze malou část. Elektrárnu lze možno řídit dálkově bez nutnosti trvalé obsluhy. Za stálý personál by mohl být brán správce areálu případně ostraha. Do cashflow se musí počítat měsíční superhrubá mzda, neboli částka, kterou musí zaměstnavatel za zaměstnance zaplatit.

Náklady režijní a jiné – mezi tyto náklady se řadí ty, které nemůžou být přímo stanovené k určitému produktu a musí být tedy rozpočítány dle určitého jiného kritéria. Případně náklady, které se do jiných kategorií nedají zařadit. Jako příklad uveďme administrativní náklady, pojištění a náklady na zařízení a nástroje potřebné k provozu.

V rámci projektu je také potřeba vzít v potaz náklady na likvidaci zařízení, rekultivaci krajiny a nápravu následků spojených s provozem zařízení. V současné době však odpovědnost za recyklaci nejproblematictějších komponentů, fotovoltaických panelů, nese výrobce sám. Zařízení při svém provozu nespotřebává žádné palivo a neprodukuje žádné škodliviny, tudíž jsou náklady na rekultivaci minimální a v tomto modelu byly zanedbány.

5.2 Daňové aspekty

5.2.1 Odpisy

Daňové odpisy se promítají do cashflow jako snížení daňového základu a tím pádem snížení daně. Odpisem se snižují pořizovací ceny investic a klesá tím hodnota stálých aktiv. V případě dotace je odepisována pouze částka, která se rovná investičním nákladům snížených o výši dotace. Jednotlivá zařízení jsou zařazena do odpisových kategorií, které určují, jak dlouho se majetek bude odepisovat a v jaké výši. Daňové odpisy se vypočítávají dle Zákona 346/2010 Sb.³⁵ Rozlišujeme dva základní způsoby odpisování. Jeden z těchto způsobů musí být určen na začátku odpisování a později se již nesmí měnit.

³⁵ Zákon č. 346/2010 Sb. Zákon, kterým se mění zákon č. 586/1992 Sb., o daních z příjmů, ve znění pozdějších předpisů, a další související zákony. In: *Sbirka zákonů*. Praha, 2010, ročník 2005, 127 a další.

Rovnoměrné odpisování – odpisy jsou dány procentní částí z pořizovací ceny snížené o dotace. V prvním roce je dána nižším procentním podílem. V ostatních letech je již výše procentního podílu konstantní. V mém modelu používám právě tuto formu odpisování.

Zrychlené odpisování – výše odpisů v prvním roce je pevně stanovena procentní koeficientem. Odpisy v následujících letech se počítají jako podíl dvojnásobku zůstatkové ceny a rozdílu koeficientu k a pořadí odpisovaného roku. Tento způsob snižuje vykazovaný účetní zisk v prvních letech provozu, tudíž je odváděna nižší daň z příjmu a podnik tak může nakládat s větším obnosem peněz. Ty mohou být investovány následně do modernizace. Tento způsob se však nedoporučuje pro nové podniky bez stabilního postavení, neboť s sebou může přinášet i negativní důsledky.[36]

Problematika daňových odpisů je daleko složitější a je spíše předmětem pro daňové účetní případně pro právníky. Pro potřeby mého mobilu stačí znalost rovnoměrných odpisů, se kterými budu nadále pracovat.

5.2.2 Daně z příjmů

Výše daní z příjmu se stejně jako výše odpisů vypočítává ze Zákona 346/2010 Sb.³⁶. Jedná se o platbu, kterou je provozovatel povinen odvést státu na základě daňového přiznání. Daň z příjmů se počítá podle následujícího vzorce.

$$D_z = \tau * (V - N_o - N_p - N_{\dot{u}} \pm P, O)[K\check{c}] \quad (21)$$

D_z = Daň z příjmů

τ = Daňová sazba

V = Příjmy z realizovaného projektu

N_o = Daňové odpisy

N_p = Provozní výdaje

$N_{\dot{u}}$ = Splacené úroky z úvěrů a obligací

$\pm P, O$ = Připočitatelné a odpočitatelné daňové položky

Může se také stát, že v daném roce vyjde základ daně záporný. Poté mluvíme o tzv. daňové ztrátě. V tom případě se daň z příjmu neplatí a tuto ztrátu můžeme uplatnit v následujících letech jako odčitatelnou položku. V ekonomickém modelu je v případě daňové ztráty nastavena hodnota výše daně na 0 a tato ztráta není uplatňována v následujících letech.

5.2.3 Osvobození od daně z příjmu

Toto osvobození bývá někdy označováno jako „daňové prázdniny“. Do roku 2010 byly fotovoltaické elektrárny osvobozeny od daní z příjmů na kalendářní rok, ve kterém byla elektrárna uvedena do provozu a na následujících 5 let. Toto osvobození však bylo zrušeno

³⁶ Zákon č. 346/2010 Sb. Zákon, kterým se mění zákon č. 586/1992 Sb., o daních z příjmů, ve znění pozdějších předpisů, a další související zákony. In: *Sbírka zákonů*. Praha, 2010, ročník 2005, 127 a další.

Zákonem 346/2010 Sb.³⁸ A v současné době musí daně z příjmu platit jak právnické, tak fyzické osoby.

5.2.4 DPH

DPH neboli daň z přidané hodnoty se týká veškerých podnikatelských subjektů, kteří jsou plátcí DPH. Podmínky k registraci plátce DPH jsou přesně stanoveny v Zákoně 235/2004 Sb., o dani z přidané hodnoty³⁷. Provozovatel fotovoltaické elektrárny z modelového příkladu by s největší pravděpodobností byl plátcem DPH. Z důvodu přehlednosti budu v modelovém příkladu však uvádět veškeré ceny již po započtení, případně odečtení DPH.

Daňové aspekty musejí být dopodrobna probrány s odborníky na toto téma, aby bylo zabráněno omylům a případnému trestnímu stíhání.

5.3 Určení výnosů

Určení výnosů je dalším důležitým krokem k vytvoření ekonomického modelu. U elektráren jsou výnosy tvořeny převážně z prodeje elektrické a tepelné energie. U některých druhů elektráren je také možné prodávat některé výsledné produkty chemických reakcí, například z čištění spalin. U spaloven komunálního odpadu tvoří příjem také výkupní cena 1 tuny odpadu, kterou je dodavatel nucený zaplatit spalovně při jeho odevzdání. Pro FVE je ale jediným výnosem pouze prodej vyrobené elektrické energie.

5.3.1 Stanovení ceny elektřiny

Od té doby, co došlo k liberalizaci trhu s elektřinou³⁸, je cena elektřiny určována tržně. Popisu fungování trhu s elektřinou a jednotlivých účastníků trhu bychom museli věnovat minimálně jednu další kapitolu. To ale není pro naše účely tolik potřebné. Nám stačí vědět, že pro Českou republiku funguje burza PXE³⁹, která umožňuje obchodování s elektrickou energií s místem dodání v Česku, na Slovensku, v Maďarsku, Polsku a Rumunsku. Na této stránce je kurzovní lístek, kde můžeme sledovat vývoj cen elektrické energie. Krátkodobé trhy jsou potom organizovány společností OTE, a.s.

Provozovatel fotovoltaické elektrárny si musí zajistit výkup vyrobené energie sám. K tomu má několik možností. Stát se sám subjektem na burze, uzavřít smlouvu s již fungujícím obchodníkem nebo uzavřít bilaterální dohodu s jedním nebo více odběrateli, jako jsou města, obce nebo velké podniky.

V ekonomickém modelu budeme vycházet z kurzovního lístku na burze PXE.[56]

5.3.2 Určení množství elektřiny

Množství elektřiny vyrobené fotovoltaickými systémy závisí na mnoho faktorech. Tyto faktory již byly probrány v kapitole 3. Způsobů, jak určit energetický zisk systému, je opět více.

³⁷ Zákon č. 235/2004 Sb., o dani z přidané hodnoty. In: *Sbírka zákonů*. Praha, 2004, ročník 2004.

³⁸ Mezi lety 2002-2006

³⁹ POWER EXCHANGE CENTRAL EUROPE, a.s. [online]. Praha [cit. 2017-01-02]. Dostupné z: <https://www.pxe.cz/>

Modelace v matematickém softwaru – tento způsob je sice náročnější, ale matematické softwary dokáží určit více než pouze množství vyrobené elektřiny. Například dokáží i modelovat různé stavy a poruchy systému. Tento způsob jsem zvolil a byl prezentován v předešlé kapitole.

Univerzální programy – existují výpočtové nástroje, které na základě zadaných dat dokáží vypočítat přibližný energetický zisk. Nejznámějším je pravděpodobně online nástroj PVGIS, který obsahuje meteorologické údaje pro oblasti Evropy, Asie a Afriky[34]. Na základě znalosti umístění a orientace panelů určí průměrné denní, měsíční a roční hodnoty ozáření. V databázi se také nachází i teplota a tudíž je tento program schopný počítat s proměnnou účinností systému. Tento online nástroj byl vytvořen Evropskou unií a je volně dostupný.

Kvalifikovaný odhad – nejrychlejší a nejjednodušší metoda. Na základě předešlých zkušeností s podobným systémem v určité oblasti je možné stanovit přibližný zisk. Tato metoda se však používá pouze na začátku projektování k vytvoření představy pro investory o tom, zdali je projekt vůbec pro ně zajímavý.

5.4 Kritéria k zhodnocení investice

Se znalostí předpokládaných finančních toků je potřeba rozhodnout o tom, jestli je projekt pro investora finančně návratný nebo zda nikoli. Rozhodnout se může na základě několika kritérií. Podle nich potom vybírá nejvhodnější možnost. Obvykle se kritéria rozdělují ze dvou hledisek. Za prvé jestli je kritérium vyjádřeno v absolutních, nebo relativních číslech a za druhé, jestli je brána v úvahu časová hodnota peněz. Dle těchto dvou hledisek je možné určit 4 následující kritéria.[71]

5.4.1 Doba návratnosti

Doba návratnosti vyjadřuje dobu, kdy se investorovi vrátí vložené investice. Nejčastěji bývá uvedena v letech. Tato metoda se velmi často užívá v případě úspor, neboť je velmi jednoduchá a lehce představitelná. V případě rozhodování mezi více investicemi není však moc vhodná, protože nezapočítává časovou hodnotu peněz a neříká nic o výši investice, ani co se děje po uplynutí této doby.

5.4.2 Návratnost investice (ROI)

Návratnost investice (angl. Return on Investments) je relativní hodnota, která určuje podíl průměrných ročních výnosů k původní investici. Kriteriaální podmínka je maximalizace tohoto indexu. Ve vzorci vypadá toto kritérium následovně:

$$ROI = \frac{\sum_{t=1}^T CF_t}{Investice} \times 100\% \quad (22)$$

Kde CF_t je cash flow v jednotlivých letech.

Problémem u tohoto kritéria je právě zanedbávání časové hodnoty peněz a také zkreslené zobrazení projektů o různých hodnotách původních investic.

5.4.3 Čistá současná hodnota (NPV)

Čistá současná hodnota (angl. Net Present Value) je kritérium, které zohledňuje časovou hodnotu peněz a jeho výsledkem je absolutní celková hodnota investice. U tohoto kritéria je důležité zvolit diskont neboli také požadovanou míru zhodnocení investice. Ve své podstatě tedy porovnáváme vybranou investici s nejlepší možnou alternativou investování peněz. Porovnání jednotlivých investic je potom jednoduché, protože stačí porovnat pouze jejich NPV. Toto kritérium také bude rozhodující v modelovém příkladu. Vzorec vypadá následovně:

$$NPV = \sum_{t=0}^T CF_t * (1 + r_n)^{-t} \quad (23)$$

Kde r_n je zvolený diskont, CF_t je Cash flow v roce t .

5.4.4 Vnitřní výnosové procento (IRR)

Vnitřním výnosovým procentem (Internal Rate of Return) zjišťujeme fiktivní hodnotu diskontu tak, aby NPV byla 0. Ve své podstatě to znamená, že když IRR je rovno naší zvolené diskontní sazbě, není projekt ani prodělečný ani výdělečný. Z toho tedy plyne, že čím větší hodnota IRR, tím lepší projekt je. Platí potom:

$$0 = \sum_{t=0}^T CF_t \times (1 + IRR)^{-t} \quad (24)$$

Nevýhodou je, že tato hodnota nemusí v určitých případech existovat.

5.5 Modelový příklad

5.5.1 Vymezení podmínek ekonomického modelu

K tomu, abych mohl modelový příklad zhodnotit z ekonomického hlediska, je potřeba stanovit určité zjednodušující podmínky.

- V průběhu životnosti projektu nebude měněna legislativa týkající se fotovoltaických elektráren a daní.
- K připojení fotovoltaické elektrárny do distribuční soustavy není potřeba výstavba dodatečného vedení.
- Inflace i růsty cen jednotlivých položek jsou konstantní.
- Není započtena výstavba dodatečné infrastruktury, jako je výstavba silnic a budov na pozemku. Není započítána cena věčných břemen majitelů okolních pozemků v případě nutnosti.
- Není uplatňována sleva dani z daňové ztráty z předešlých let.
- Skutečná životnost komponentů se rovná udávané životnosti.
- Po dobu životnosti projektu se neočekává výrazná změna klimatu.

5.5.2 Náklady

Počet a typ jednotlivých komponent byl stanoven již v kapitole 4. Cena jednotlivých komponent byla odvozena z online katalogů jednotlivých firem, případně typově podobných produktů. V případě, že nebyly informace k dispozici, byla cena odhadnutá. Investiční výdaje FVE zobrazuje Tabulka 8:

Výdaje					
Investiční					
Položka	Životnost	Symbol	Jednotková cena [Kč]	Počet jednotek	Celkem
FV Panel	25	N _{FVP}	12 500	2 400	30 000 000
Střídač	25	N _{INV}	2 700 000	2	5 400 000
Kabel SS	15	N _{KSS}	100	6 800	680 000
Kabel Stř	15	N _{kst}	300	200	60 000
Nosné konstrukce	25	N _{kon}	30 000	200	6 000 000
Projekt	25	N _{pro}	100 000	1	100 000
Transformátor	25	N _{trf}	202 500	2	405 000
Ochrana Stringů	10	N _{poi}	200	400	80 000
Odpojovače	20	N _{odp}	4 000	20	80 000
Montáž	25	N _{mon}	1 000 000	1	1 000 000
Oplocení	25	N _{opl}	300 000	1	300 000
Monitorovací zařízení	10	N _{mon}	30 000	1	30 000
Doprava a logistika	25	N _{dop}	150 000	1	150 000
Pozemek	25	N _{poz}	600 000	1	600 000
Přípojka	25	N _{při}	30 000	1	30 000
Elektroměr	20	N _{elm}	10 000	1	10 000
Ochranné prvky	25	N _{och}	40 000	1	40 000
PV Combiner Box	13	N _{box}	3 000	16	48 000
DC/DC Converter	25	N _{DCC}	20 000	8	160 000
Součet					45 653 000

Tabulka 8: Investiční výdaje modelového příkladu

Provozní náklady FVE tvoří pouze malou část celkových nákladů. Občas se provozní výdaje udávají jako procentní část investičních nákladů. Já jsem zvolil vyjádření v absolutních hodnotách. Provozní náklady v prvním roce provozu byly odhadnuty tak, jak ukazuje Tabulka 9.

Výdaje						
Provozní						
Položka	Kategorie	Počet ročně	Symbol	CZK	Počet jednotek	Celkem
Administrace	Režijní + Jiné	12	N _{adm}	96 000	1	96 000
Údržba pozemku	Údržba + opravy	6	N _{udr}	30 000	1	30 000
Práce na systému	Údržba + opravy	2	N _{pra}	10 000	1	10 000
Revize systému	Údržba + opravy	1	N _{rev}	20 000	1	20 000
Pojištění	Režijní + Jiné	1	N _{poj}	10 000	1	10 000
Součet				Osobní		0
				Údržba + opravy		60 000
				Náhradní díly		0
				Režijní + Jiné		106 000

Tabulka 9: Provozní výdaje modelového příkladu

5.5.3 Výnosy

Cena elektřiny byla vzata jako roční průměrná hodnota base load na PXE. Tedy 35 € / MWh.

Množství vyrobené elektřiny bylo spočítáno matematickým modelem. V případě, že by tato hodnota nebyla k dispozici, je možno odhadnout množství vyrobené energie za pomoci jednoduchého vzorce:

$$Q_{el} = \eta \times P_{inst} \times E_I \left[kWh; -; kWp; \frac{kWh}{m^2 \times rok} \right] \quad (25)$$

Kde Q_{el} je množství vyrobené elektřiny, P_{inst} je instalovaný výkon, E_I je množství dopadající energie na 1 m² za rok, η je účinnost systému.

V případě, že jsou v modelu zadány hodnoty jak ze simulace měření, tak i z pomocného výpočtu, je dána přednost hodnotě ze simulace. Do ekonomického modelu je také započítána degradace systému. Ta se udává jako meziroční procentní pokles. Výkon a s ním i množství vyrobené energie tedy klesají exponenciálně. Zadané hodnoty ukazuje Tabulka 10.

Výnosy		
Množství dodané energie do sítě		
Data ze simulace/ měření	1070,6	MWh
Pomocný výpočet pokud nejsou data k dispozici		
Instalovaný výkon	1044	KWp
Dopadající výkon solárního záření za rok	1250	kWh/m2/rok
Účinnost systému	85%	[-]
Vyrobene energie	1109,25	MWh
Degradace systému		
Meziroční snižování výkonu	0,5%	% / rok
Výkupní cena elektřiny		
Výkupní cena 1 MWh v 1. roce	Měna	CZK/MWh
35	€	945

Tabulka 10: Příjmy modelového příkladu

5.5.4 Ekonomické ukazatele

Mezi ekonomické ukazatele řadíme reálný diskont, nominální diskont, inflace a daňovou sazbu. Inflace α_i , jakožto obecné zvýšení cenové hladiny, byla zvolena 2%. Reálný diskont určuje investor jako požadovanou míru zhodnocení projektu. V tomto případě byl zvolen reálný diskont r_r 8 %. Nominální diskont r_n se potom spočítá z obou těchto hodnot jako součin. Ve vzorci poté:

$$r_n = (1 + r_r) \times (1 + \alpha) - 1 [-] \quad (26)$$

Daňová sazba τ je stanovena na 19 % a je brána jako neměnná v průběhu životního cyklu projektu. Ekonomické ukazatele zobrazuje Tabulka 11.

Ekonomické ukazatele		
Ukazatel	Symbol	Hodnota
Reálný diskont	r	8,00%
Inflace	α_i	2,00%
Nominální diskont	r_n	10,16%
Daňová sazba	τ	19%

Tabulka 11: Ekonomické ukazatele modelového příkladu

5.5.5 Odpisy

O odpisy snižujeme daňový základ. Elektrárna je zařazena do odpisové skupiny číslo 4. Tudíž celou elektrárnu odpisujeme 20 let. Odpisy byly zvolené rovnoměrné a procentní podíly jsou uvedeny v následující tabulce (Tabulka 12).

Daňové odpisy	
Odpisová skupina	4
Doba odpisování	20
Daňový odpis 1. rok	2,15%
Odpisy v následujících letech	5,15%

Tabulka 12: Parametry pro daňové odpisy modelového příkladu

5.5.6 Dotace

V současné době žádné dotace na nově postavené fotovoltaické elektrárny s výkonem nad 10 kWp nejsou. Přesto je v ekonomickém modelu tato možnost umožněna. Může být počítáno jak s dotacemi investičními, o které se zároveň snižují odpisy, tak zároveň i s ročními nedaněnými dotacemi. V tomto případě jsou oboje dotace rovné 0 Kč.

5.5.7 Výměna komponentů

Některé komponenty mohou mít nižší životnost než celý systém a je tedy nutná jejich výměna. Náklady na tuto výměnu jsou započítány do provozních nákladů. Detailní rozpis těchto nákladů je zobrazen na samostatném listu.

5.5.8 Meziroční růst cenové hladiny

V hodnotících kritériích se používá 2% inflace. Tato inflace je brána jako cílová inflace ČNB [17]. V našem modelu je možné nastavit rozdílný meziroční nárůst cen pro jednotlivé skupiny provozních nákladů a také pro výkupní cenu elektřiny. V případě, že se zvolí možnost „Ne“, není s meziročním růstem počítáno vůbec. Tyto hodnoty byly nastaveny tak, jak ukazuje Tabulka 13.

Meziroční nárůst cenové hladiny		
Položka	Ano/Ne	Meziroční % rozdíl
Provozní - Osobní	Ano	1%
Provozní - Údržba + oprava	Ne	2%
Provozní náhradní díly	Ano	1%
Provozní jiné	Ne	2%
Výkupní cena	Ano	3%

Tabulka 13: Meziroční růst cenových hladin

5.6 Zhodnocení modelového příkladu z ekonomického hlediska

5.6.1 Stanovení Cash flow

Detailní rozpis jednotlivých položek je v listu 'Výpočet NPV'. Jsou zde rozepsány jednotlivé náklady a výnosy v daných letech, dotace a také zdanitelné položky. V řádku 'Celkem' jsou ukázány výsledné hodnoty cash flow pro každý rok zvlášť. Celkový cash flow od začátku projektu k danému roku je v řádku 'CCF'. Diskontovaný cash flow v jednotlivých letech je v řádku 'DCF' a celkový kumulovaný diskontovaný cashflow je v řádku 'CDCF'. Rozpis zobrazuje Tabulka 14 a Tabulka 15.

Jelikož se pohybujeme v rádech milionů, je zbytečné u řádků s celkovými cash flow zobrazovat hodnoty do poslední koruny. Proto jsou tyto hodnoty zobrazeny v tisících Kč.

		Rok											
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Náklady	Investiční	45 653 000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Osobní	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Údržba + opravy	0	60 000	60 000	60 000	60 000	60 000	60 000	60 000	60 000	60 000	60 000	60 000
	Náhradní díly	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	120 305	0
	Jiné	0	106 000	106 000	106 000	106 000	106 000	106 000	106 000	106 000	106 000	106 000	106 000
	Celkem výdaje	45 653 000	166 000	166 000	166 000	166 000	166 000	166 000	166 000	166 000	166 000	166 000	286 305
		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Výnosy	Dodané elektřiny	0	1 071	1 065	1 060	1 055	1 049	1 044	1 039	1 034	1 029	1 023	1 018
	Cena za MWh	0	945	973	1 003	1 033	1 064	1 096	1 128	1 162	1 197	1 233	1 270
	Celkem příjmy	0	1 011 717	1 036 858	1 062 624	1 089 030	1 116 093	1 143 828	1 172 252	1 201 382	1 231 237	1 261 833	1 293 189
		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Dotace	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Zdanitelné položky	Odpisy	0	981 540	2 351 130	2 351 130	2 351 130	2 351 130	2 351 130	2 351 130	2 351 130	2 351 130	2 351 130	2 351 130
	Výdaje	0	166 000	166 000	166 000	166 000	166 000	166 000	166 000	166 000	166 000	286 305	166 000
	Příjmy	0	1 011 717	1 036 858	1 062 624	1 089 030	1 116 093	1 143 828	1 172 252	1 201 382	1 231 237	1 261 833	1 293 189
	Základ daně	0	-135 823	-1 480 271	-1 454 505	-1 428 099	-1 401 037	-1 373 302	-1 344 878	-1 315 747	-1 285 893	-1 375 602	-1 223 940
	Daň	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cash Flow [tis. Kč]	Celkem	-45 653	846	871	897	923	950	978	1 006	1 035	1 065	976	1 127
	CCF	-45 653	-44 807	-43 936	-43 040	-42 117	-41 167	-40 189	-39 183	-38 147	-37 082	-36 106	-34 979
	DCF	-45 653	768	718	671	627	586	547	511	477	446	371	389
	CDCF	-45 653	-44 885	-44 168	-43 497	-42 870	-42 284	-41 737	-41 226	-40 749	-40 303	-39 932	-39 543

Tabulka 14: Rozpis výpočtu NPV - 1. část

Rok													
12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
60 000	60 000	60 000	60 000	60 000	60 000	60 000	60 000	60 000	60 000	60 000	60 000	60 000	60 000
0	54 088	0	1 402 359	0	0	0	0	241 622	0	0	0	0	0
106 000	106 000	106 000	106 000	106 000	106 000	106 000	106 000	106 000	106 000	106 000	106 000	106 000	106 000
166 000	220 088	166 000	1 568 359	166 000	166 000	166 000	166 000	407 622	166 000	166 000	166 000	166 000	166 000
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1 013	1 008	1 003	998	993	988	983	978	973	968	964	959	954	949
1 308	1 347	1 388	1 429	1 472	1 516	1 562	1 609	1 657	1 707	1 758	1 811	1 865	1 921
1 325 325	1 358 259	1 392 012	1 426 604	1 462 055	1 498 387	1 535 622	1 573 782	1 612 890	1 652 971	1 694 047	1 736 144	1 779 287	1 823 503
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2 351 130	2 351 130	2 351 130	2 351 130	2 351 130	2 351 130	2 351 130	2 351 130	2 351 130	0	0	0	0	0
166 000	220 088	166 000	1 568 359	166 000	166 000	166 000	166 000	407 622	166 000	166 000	166 000	166 000	166 000
1 325 325	1 358 259	1 392 012	1 426 604	1 462 055	1 498 387	1 535 622	1 573 782	1 612 890	1 652 971	1 694 047	1 736 144	1 779 287	1 823 503
-1 191 804	-1 212 958	-1 125 117	-2 492 884	-1 055 075	-1 018 743	-981 508	-943 348	-1 145 861	1 486 971	1 528 047	1 570 144	1 613 287	1 657 503
0	0	0	0	0	0	0	0	0	282 524	290 329	298 327	306 525	314 925
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1 159	1 138	1 226	-142	1 296	1 332	1 370	1 408	1 205	1 204	1 238	1 272	1 307	1 343
-33 820	-32 682	-31 456	-31 598	-30 301	-28 969	-27 599	-26 192	-24 986	-23 782	-22 544	-21 272	-19 966	-18 623
363	324	316	-33	276	257	240	224	174	158	147	137	128	119
-39 180	-38 857	-38 541	-38 574	-38 298	-38 041	-37 801	-37 577	-37 403	-37 245	-37 098	-36 961	-36 832	-36 713

Tabulka 15: Rozpis výpočtu NPV - 2. část

5.6.2 Kritéria pro hodnocení výnosnosti investičních projektů

O tom, co která kritéria znamenají a jak se počítají, bylo již pojednáno v kapitole 5.4. Nyní se již můžeme podívat na to, jak vyšly.

Kritéria pro hodnocení výnosnosti investičních projektů	
NPV	-36 712 941 Kč
ROI	2,37 %
IRR	-3,48%
Diskont	-5,37%
Doba návratnosti	>25

Tabulka 16: Kritéria pro hodnocení výnosnosti investičních projektů

Tabulka 16 obsahuje vypočítaná kritéria pro hodnocení investic. Na první pohled je zřejmé, že tato investice není výhodná. Řekli jsme si, že nejvíce věrohodná jsou kritéria NPV a IRR, která berou v potaz časovou hodnotu peněz. NPV nám vyšlo -36,7 mil. Kč, V porovnání s původní investicí 45,5 mil. Kč se tedy jedná o velmi malý zisk.

ROI nám také ukazuje, že je tato investice velmi nevýhodná. Tato hodnota nám říká, že z této investice se nám vrátí průměrně pouze 2,37 % ročně. Dohromady to dává za 25 let zhruba 60 %.

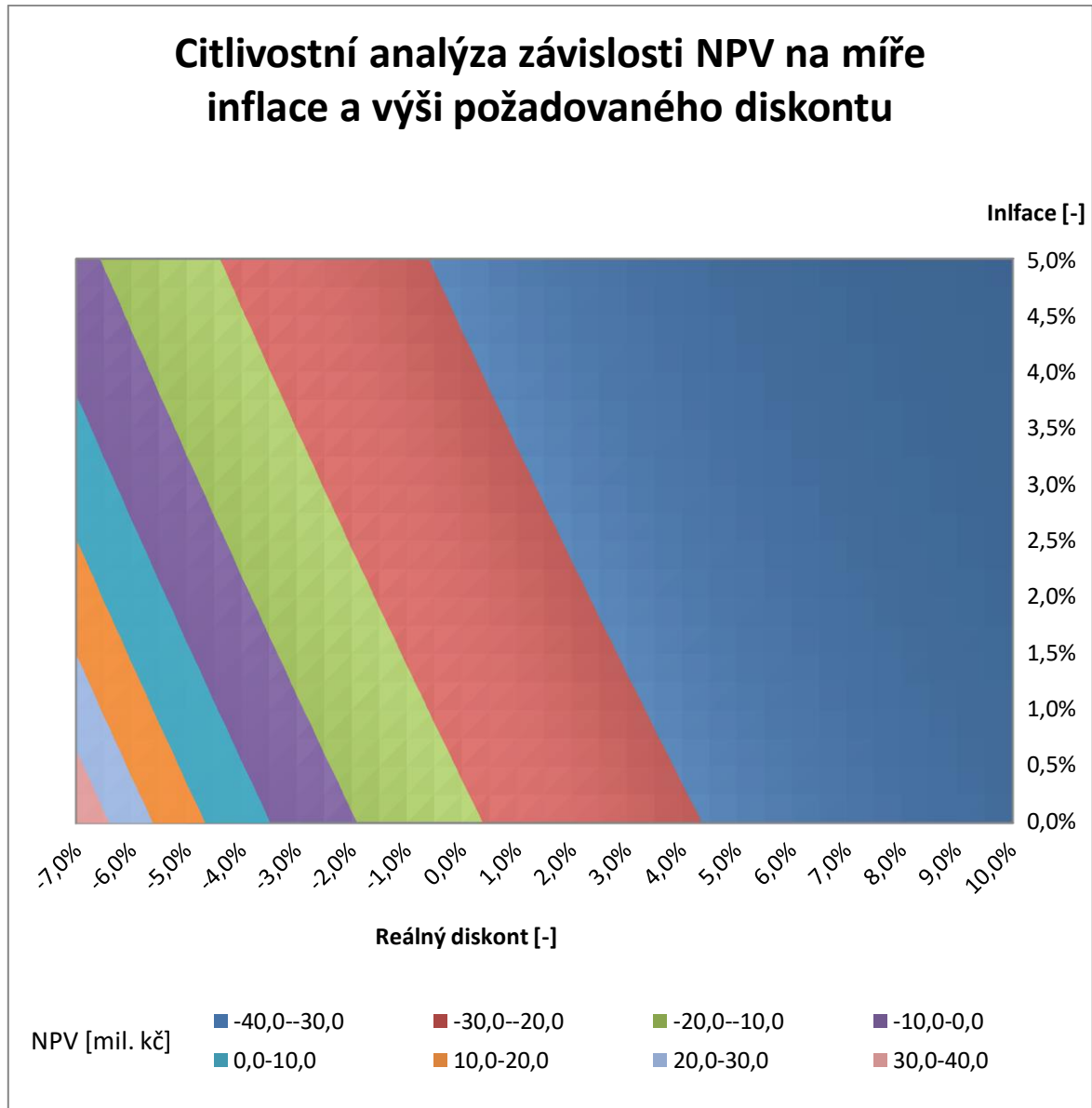
Doba návratnosti vyšla větší než 25 let, což je zřejmé z předchozích výsledků.

IRR neboli vnitřní výnosové procento vyšlo záporné. Po odečtení inflace vyšlo, že požadovaný diskont investora by musel být -5,4 %. Žádný racionálně a ekonomicky myslící člověk by neinvestoval do projektu a očekával už od samého počátku, že bude prodělávat 5,4 % ročně.

Tyto výpočty ukázaly, že za těchto podmínek je tento projekt nerealizovatelný. Dalším úkolem bude ukázat, jak se ukazatel NPV mění v závislosti na různých parametrech a jaké by musely být podmínky, aby se tato investice vyplatila.

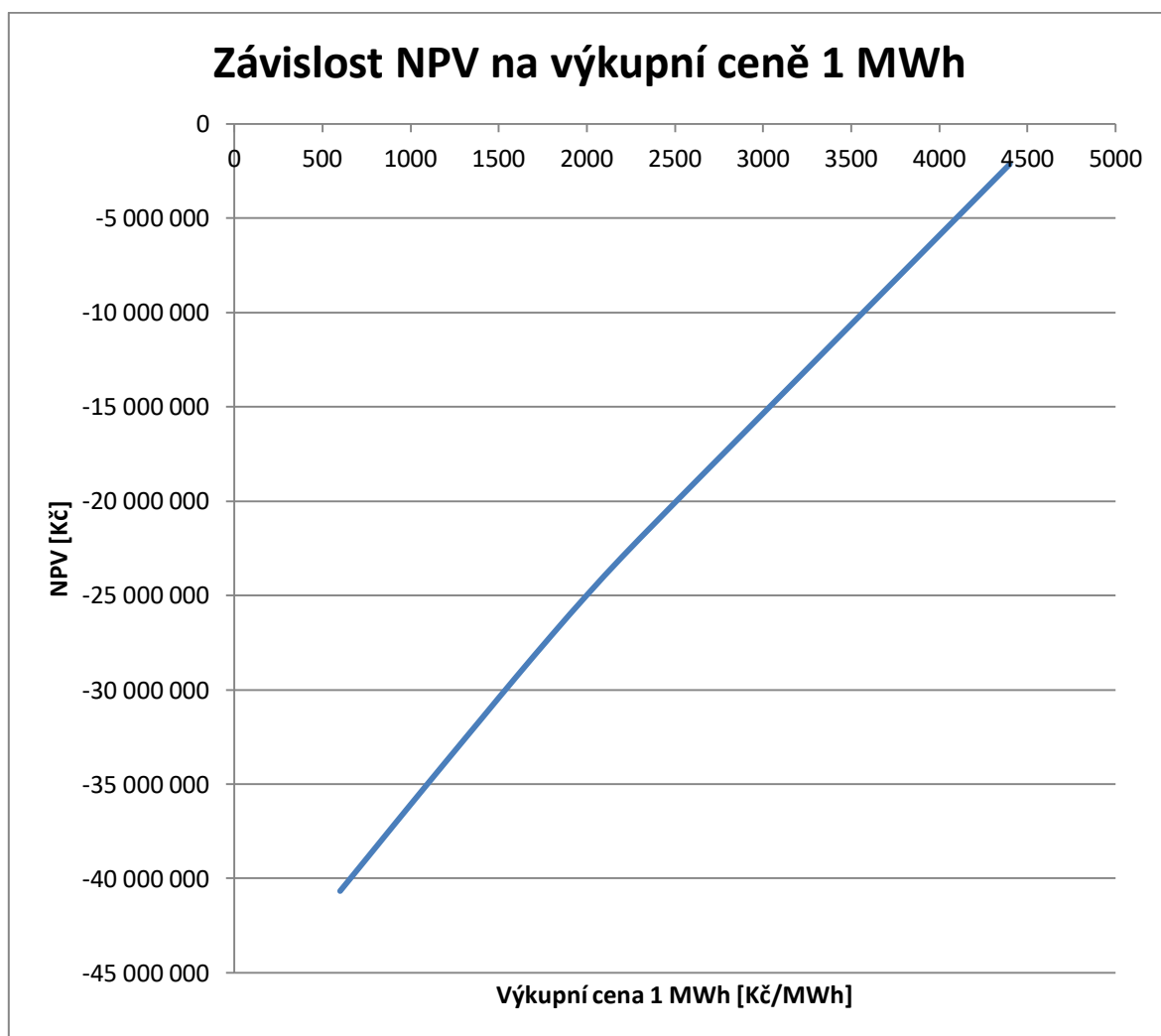
5.6.3 Citlivostní analýzy

Citlivostní analýzy slouží k přehlednému zobrazení vlivu jednoho parametru na sledovanou veličinu. Byly provedeny 3 citlivostní analýzy. Všechny tři sledují vliv parametrů na celkové NPV. V prvním případě je sledován vliv inflace a požadovaného diskontu. Výsledek ukazuje Obrázek 27. Nulovou hranicí je přelom fialové a tyrkysové oblasti. Při 0% inflaci by byl požadovaný reálný diskont zhruba -3 %. Inflace je cílována ČNB a snaha je, aby byla kladná. Do tohoto projektu by i při nulové inflaci ekonomicky inteligentní člověk nikdy neinvestoval.



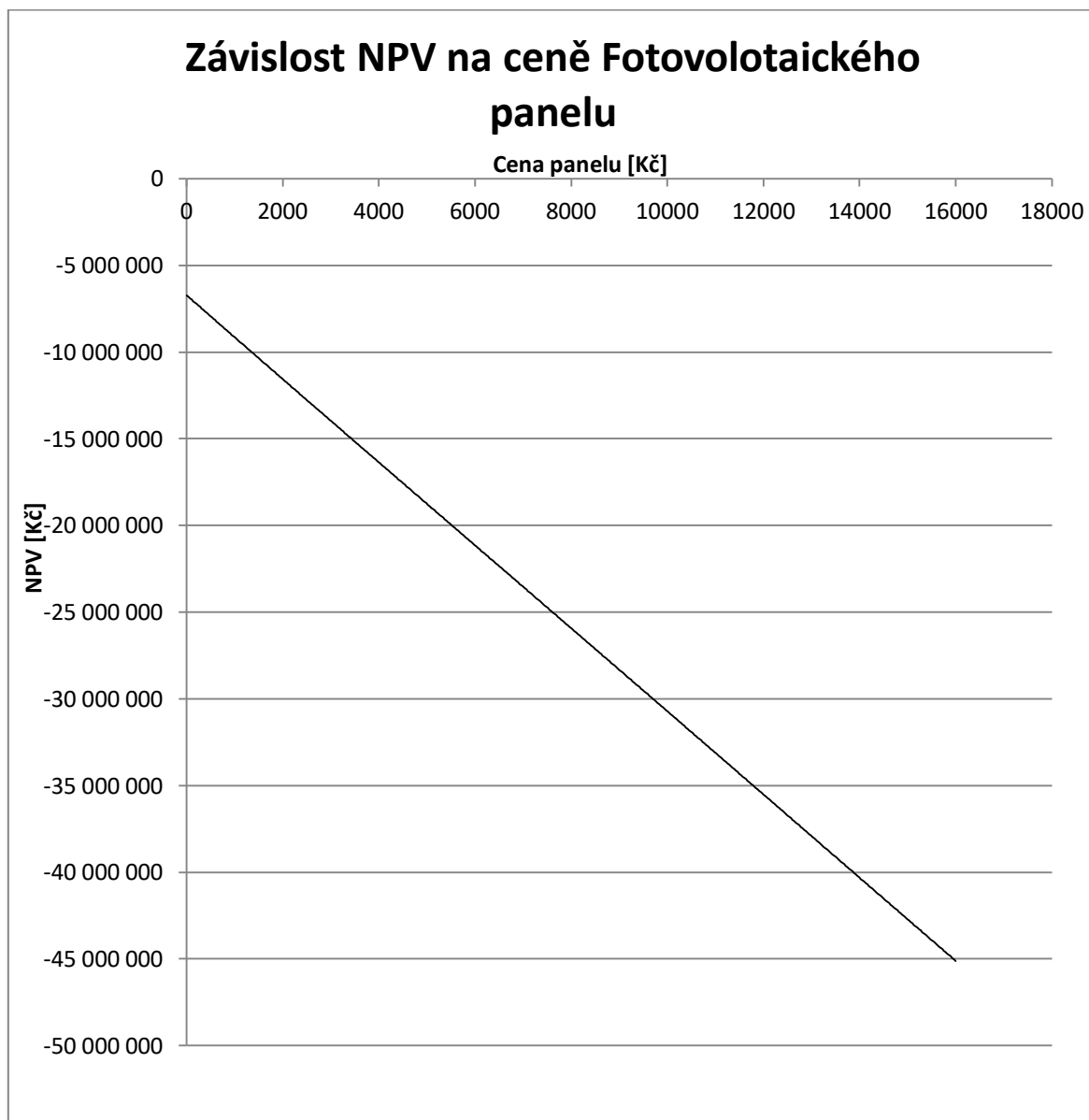
Obrázek 27: Citlivostní analýza závislosti NPV na míře inflace a výši požadovaného diskontu

Druhá citlivostní analýza se týká výkupní ceny elektřiny. Tato cena je v průběhu let rostoucí a to s meziročním růstem 3 %. Vývoj ceny elektřiny se velmi těžko predikuje, svou zásluhu na tom mají právě i fotovoltaické systémy. Já jsem zvolil pro majitele elektrárny optimistický stav a to trvalý růst cen elektřiny. Obrázek 28 zobrazuje závislost NPV na výkupní ceně. Zobrazena je křivka pro rozmezí hodnot 600Kč – 4 400 Kč. Je vidět, že tato křivka není lineární. Důvodem je, že s rostoucí výkupní cenou elektřiny rostou příjmy a po překročení určité částky již není záporný daňový základ a tudíž je potřeba začít odvádět daň z příjmu.



Obrázek 28: Citlivostní analýza závislosti NPV na výkupní ceně 1 MWh

Třetí citlivostní analýza se týká ceny námi zvoleného panelu. Panely tvoří z investičních výdajů největší položku (téměř 2/3). Fotovoltaické panely také procházejí intenzivním vývojem a dá se u nich očekávat pokles cen a zároveň zlepšení vlastností. Z tohoto důvodu byla vytvořena citlivostní analýza pouze na tento komponent. Obrázek 29 ukazuje trend závislosti NPV na výkupní ceně FV panelu. Je vidět, že i pokud by cena těchto panelů byla nulová, tak i přesto by NPV bylo záporné.



Obrázek 29: Citlivostní analýza závislosti NPV na ceně fotovoltaického panelu

5.7 Zjištění mezních podmínek

V předchozím textu jsme si ukázali, že modelový příklad zvolené fotovoltaické elektrárny je nerentabilní. Je důležité stanovit podmínky, za kterých by se tento projekt vyplatil. V každém z následujících případů vždy ponechám původní hodnoty a předpoklady a budu zjišťovat velikost pouze jedné veličiny. Rozhodl jsem se zjišťovat mezní podmínky čtyř veličin. Potřebná výroba elektřiny, dotace investiční, výkupní cena elektřiny (v prvním roce) a cena fotovoltaických panelů. Výsledky těchto analýz ukazuje Tabulka 17.

Výpočet mezních podmínek aby NPV = 0			
Cena elektřiny za 1 MWh	171,34	€	4 626 Kč
Potřebná výroba elektřiny	5 241	MWh	
Dotace Investiční (Snížení prvotní investice)	37 690 016	Kč	
Cena panelu	-128	\$	-3 204 Kč

Tabulka 17: Mezní podmínky aby NPV = 0

5.7.1 Potřebná garantovaná výkupní cena

Mezní hodnota výkupní ceny elektřiny, aby investice byla návratná, je 171,3 €/ MWh neboli při kurzu 27 Kč / € zhruba 4 600. Tato hodnota je zhruba 4,5× větší než hodnota elektřiny na burze PXE. Pokud se ale podíváme na garantované výkupní ceny elektřiny pro elektrárny s instalovaným výkonem nad 5 MW postavené do 31. 12. 2011 (viz Tabulka 5), vidíme, že pro tyto elektrárny je tato cena i v dnešních dnech garantována dokonce vyšší. Samozřejmě je nutné poznamenat, že za posledních 10 let zažily fotovoltaické panely nezanedbatelný rozmach, co se týče účinnosti a také výrazný pokles cen na jednotku instalovaného výkonu. Přesto lze předpokládat, že investice do elektráren z období do konce roku 2011 jsou návratné. Ze zkušeností můžeme tedy prohlásit, že garance výkupní ceny elektřiny je jedna z možností jak dosáhnout ziskovosti investice.

5.7.2 Potřebná výše výroby elektřiny

Aby elektrárna z modelového příkladu byla výdělečná, musela by vyrobit téměř 5× více elektrické energie. Vzhledem k tomu, že současná účinnost přeměny sluneční energie na elektrickou se pohybuje řádově 15 – 20 %, by to znamenalo, že by tento systém musel pracovat s účinností přeměny 75 - 100 %, což je se současnými technologiemi nemožné.

5.7.3 Potřebná výše dotace na výstavbu

Zjistili jsme, že potřebná investiční dotace by musela činit 37,7 mil. Kč. To u instalovaného výkonu 1044 kW činí zhruba 36 100 Kč/kWp. Současný program Nová zelená úsporám nabízí maximální výši 100 000 Kč a to na elektrárny do instalovaného výkonu 10 kWp. Tato dotace by musela být zhruba 3,5× vyšší, než je současně nabízena. Varianta s investiční dotací je také reálná, avšak v současné době, kdy jsou jednotlivé státy

poněkud opatrné k vysokým dotacím fotovoltaických systémů, nelze očekávat další mohutné dotace do FVE větších výkonů.

5.7.4 Potřebná cena jednoho panelu

Fotovoltaické panely tvoří u investičních nákladů majoritní položku. Proto jsem u mezních podmínek vzal v úvahu i tuto variantu. Jak ukazuje Tabulka 17, cena jednoho FV panelu by musela být zhruba -3 200 Kč, tedy záporná. Nutno tedy konstatovat, že pouhým snižováním ceny panelů nelze dosáhnout návratnosti investice.

5.8 Zhodnocení

Pomocí mnou vytvořeného nástroje v tabulkovém procesoru Microsoft Excel jsem zhodnotil z ekonomického hlediska modelový příklad fotovoltaické elektrárny připojené do distribuční soustavy. Hodnoty modelu byly voleny spíše jako optimistické prognózy, přesto se tato elektrárna z ekonomického hlediska v současné době nevyplatí. Tento výsledek není překvapením, neboť po roce 2013, kdy byly definitivně zrušeny veškeré dotace pro nové fotovoltaické elektrárny, přibývá instalovaný výkon minimálně oproti rozmachu v roce 2009. I přesto je stále Česká republika se svým instalovaným výkonem fotovoltaických zdrojů na 15. místě ve světě [40], což je pro zemi, která nemá ideální podmínky pro využívání sluneční energie, rozhodně zamyšlení hodné.

Také jsem určil, za jakých podmínek by tato elektrárna byla výdělečná. Zjistil jsem, že není možné změnou ceny panelu nebo zvýšením účinnosti dosáhnout návratnosti investice dle kritéria NPV. Tudíž zbývají možnosti zvýšené výkupní ceny, případně dotace. Je tedy zřejmé, že pokud by někdo chtěl takovýto projekt realizovat, neobejde se bez pomoci státu, případně Evropské unie. Podpora evropských politiků, co se fotovoltaických systémů týká, je momentálně směřována daleko víc na střešní systémy s instalovaným výkonem maximálně několik desítek kW. Tudíž na podporu státu při výstavbě volně stojící FVE většího výkonu nelze spoléhat.

6 Závěr

V první kapitole této práce je popsáno aktuální postavení fotovoltaických elektráren v České republice i ve světě. Uvedeny jsou nejdůležitější zákony týkající se této problematiky i možné nástroje prosazování využití obnovitelných zdrojů energie.

Druhá kapitola je zacílena na popsání nejdůležitějších vlastností jednotlivých prvků fotovoltaického systému, které byly důležité při vytváření následných modelů. Pozornost je věnována i charakteristickým rysům provozu, jako jsou možnosti akumulace a možné defekty fotovoltaických elektráren. Část této kapitoly je věnována charakteristikám fotovoltaické elektrárny připojené do soustavy, především připojovacím podmínkám a možným zpětným vlivům na soustavu.

Další kapitola se již zabývá samotnou modelací elektrárny. Nejdříve bylo nutné stanovit samotné rozvržení elektrárny, z jakých komponent se bude skládat a kolik jich bude potřeba. Poté byla tato elektrárna namodelována v matematickém softwaru MATLAB Simulink. Na modelu elektrárny připojené do distribuční soustavy můžeme pozorovat její chování při různých hodnotách osvětlení a teplotách panelů. Zadány byly charakteristické hodnoty pro jednotlivé měsíce a byl určen průměrný měsíční výkon. Na základě dostupných meteorologických dat bylo následně vypočítáno průměrné množství vyrobené energie, které činilo zhruba 1070 MWh ročně.

Tato hodnota byla posléze jedna ze vstupních dat do druhého modelu. Ten vypočítal nejdůležitější kritéria k zhodnocení dané investice, vytvořil potřebné citlivostní analýzy a stanovil mezní hodnoty parametrů vybraných pro tento model. Vyšlo, že čistá současná hodnota této investice je zhruba -36,7 miliónů korun.

První model sloužící k pozorování elektrických veličin i druhý univerzální model pro použití na libovolný projekt klasické fotovoltaické elektrárny je k nalezení v příloze této diplomové práce a v digitální knihovně ČVUT na adrese <https://dspace.cvut.cz>.

Výsledkem této práce je zjištění, že se za současného stavu v České republice ekonomicky nevyplatí stavět novou fotovoltaickou elektrárnu o výkonu jednotek MW. I přesto, že jsem volil optimistické varianty, je tato elektrárna nevýhodná dle všech čtyř vypočítaných kritérií. Aby byla výstavba takovéto elektrárny pro investora ekonomicky zajímavá, musela by výkupní cena elektřiny být zhruba $4,5 \times$ větší, než je dnes na burze, případně by její výstavba musela být významně dotována. Zvyšováním účinnosti přeměny sluneční energie ani snižováním cen komponentů nelze dosáhnout návratnosti investice.

7 Seznam použité literatury

- [1] ABB. *Smart grids: What is a smart grid?* [online]. Curych [cit. 2016-12-01]. Dostupné z: <http://new.abb.com/smartgrids/what-is-a-smart-grid>
- [2] American Physical Society Sites. *This Month in Physics History: April 25, 1954: Bell Labs Demonstrates the First Practical Silicon Solar Cell* [online]. Maryland, 2009 [cit. 2016-12-21]. Dostupné z: <http://www.aps.org/publications/apsnews/200904/physicshistory.cfm>
- [3] BENDA, Vítězslav. *Studijní materiály k předmětu A1M13EZF: Provozní spolehlivost fotovoltaických systémů*. Praha, ČVUT
- [4] BOLINGER, Mark a Ryan WISER. *Support for PV in Japan and Germany* [online]. Berkeley, 2002 [cit. 2016-12-21]. Dostupné z: <https://emp.lbl.gov/sites/all/files/case-study-pv-in-japan-germany.pdf>
- [5] BOYLE, Godfrey. *Renewable electricity and the grid: the challenge of variability*. Sterling, VA: Earthscan, c2007. ISBN 978-184-4074-181.
- [6] BP. *BP Statistical Review of World Energy June 2016* [online]. Londýn, 2016 [cit. 2016-11-24]. Dostupné z: <http://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/energy-economics/statistical-review-2016/bp-statistical-review-of-world-energy-2016-full-report.pdf>
- [7] Current Results: weather and science facts. *Weather Averages for European Cities* [online]. Smithers BC: Current Results Publishing [cit. 2017-01-02]. Dostupné z: <https://www.currentresults.com/Weather/Europe/Cities/average-european-city-weather.php>
- [8] ČEPS, a.s. *Data do kapsy 2015*. Praha, 2016
- [9] ČEPS, a.s. *Kodex PS* [online]. Praha, 2016 [cit. 2016-12-13]. Dostupné z: <https://www.ceps.cz/CZE/Data/Legislativa/Kodex/Stranky/default.aspx>
- [10] ČEZ Distribuce, a.s. *Pravidla provozování DS* [online]. Děčín, 2016 [cit. 2016-12-13]. Dostupné z: <http://www.cezdistribuce.cz/cs/energeticka-legislativa/pravidla-provozovani-ds.html>
- [11] ČEZ, a.s. *Historie českého elektrárenství*. [online]. Praha: ČEZ, a.s [cit. 2016-11-20]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/vyzkum-a-vzdelavani/pro-zajemce-o-informace/historie-a-soucasnost/historie-ceskeho-elektrarenstvi.html>
- [12] ČEZ, a.s. *Aktivity a strategie Skupiny ČEZ* [online]. Praha: ČEZ, a.s [cit. 2016-11-20]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/uhelne-elektrarny/strategie-a-aktivity-cez-v-oblasti-ue.html>
- [13] ČEZ, a.s. *FOTOVOLTAIKA: Solární (fotovoltaické) články* [online]. Praha [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/k32.htm>
- [14] ČEZ, a.s. *Smart grids: Vrchlabí* [online]. Praha [cit. 2016-12-01]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/vyzkum-a-vzdelavani/vyzkum-a-vyvoj/subjekty-v-oblasti-vyzkumu-a-vyvoje/eu-verejne-zdroje-financovani/smart-grids/info-k-sr-vrchlabi.html>
- [15] ČEZ, a.s. *Uhelné elektrárny* [online]. Praha [cit. 2016-11-20]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/uhelne-elektrarny.html>
- [16] ČEZ, a.s.: Kolektiv autorů. *Obnovitelné zdroje energie a možnosti jejich uplatnění v České republice* [online]. Praha, 2007 [cit. 2016-11-24]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/file/energie-a-zivotni-prostredi/oze-cr-all-17-01-obalka-in.pdf>

- [17] ČNB: Česká národní banka [online]. Praha [cit. 2017-01-02]. Dostupné z: <http://www.cnb.cz>
- [18] ČSN CLC/TS 61836. *Solární fotovoltaické energetické systémy - Termíny, definice a značky*. Praha: Úřad pro normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [19] ČSN EN 60891 ED.2. *Fotovoltaické součástky - Postupy pro korekce teploty a ozařování na změřených voltampérových charakteristikách*. Praha: Úřad pro normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [20] ČSN EN 60904 část 1-10. *Fotovoltaické součástky*. Praha: Úřad pro normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- [21] ČSN EN 61853-1. *Zkoušení výkonu a jmenovitých údajů energie fotovoltaického (PV) modulu - Část 1: Měření výkonnosti ozařování a teploty a jmenovité údaje výkonu*. Praha: Úřad pro normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [22] DRÁBOVÁ, Dana a Václav PAČES. *Perspektivy české energetiky: současnost a budoucnost*. Praha: Novela bohemia, 2014. ISBN 978-80-87683-26-2.
- [23] EAGRI: Voda. *Správci vodních toků* [online]. Praha [cit. 2016-11-24]. Dostupné z: <http://eagri.cz/public/web/mze/voda/spravci-vodnich-toku/>
- [24] EIA: The U.S. Energy Information Administration. *Annual Photovoltaic Cell/Module Shipments Report*. [online]. Washington DC, 2016 [cit. 2016-11-23]. Dostupné z: http://www.eia.gov/renewable/annual/solar_photo/
- [25] Elektrina.cz. *Liberalizace trhu s elektřinou* [online]. Praha [cit. 2016-12-01]. Dostupné z: <http://www.elektrina.cz/liberalizace-trhu-s-elektrinou-nizsi-ceny-pro-koncove-zakazniky-neprinesla>
- [26] Encyklopedie fyziky. *Seebeckův Jev* [online]. [cit. 2016-11-30]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/910-seebeckuv-jev>
- [27] Energy Transition: The German Energiewende. *The German Energiewende Book* [online]. Berlín [cit. 2016-11-18]. Dostupné z: <https://book.energytransition.org/>
- [28] EPA: US Environmental Protection Agency. *Global Greenhouse Gas Emissions Data* [online]. Washington DC [cit. 2016-11-24]. Dostupné z: <https://www.epa.gov/ghgemissions/global-greenhouse-gas-emissions-data>
- [29] ERÚ: Energetický regulační úřad. *Často kladené dotazy* [online]. Praha, 2016 [cit. 2016-12-21]. Dostupné z: [Dostupné z: https://www.eru.cz/poze/casto-kladene-dotazy#7](https://www.eru.cz/poze/casto-kladene-dotazy#7)
- [30] ERÚ: Energetický regulační úřad. *Platná cenová rozhodnutí: Podporované zdroje energie* [online]. Praha, 2016 [cit. 2016-11-30]. Dostupné z: <https://www.eru.cz/cs/poze/cenova-rozhodnuti/platna-cenova-rozhodnuti>
- [31] ERÚ: Energetický regulační úřad. *Přehled údajů o licencích udělených ERÚ* [online]. Praha, 2016 [cit. 2016-11-23]. Dostupné z: <http://licence.eru.cz/index.php?>
- [32] ERÚ: Energetický regulační úřad. *Roční zpráva o provozu ES ČR: 2015* [online]. Praha, 2016 [cit. 2016-11-20]. Dostupné z: http://www.eru.cz/documents/10540/462820/Rocni_zprava_provoz_ES_2015.pdf/3769f65b-3789-4e93-be00-f84416e1ca03
- [33] ERÚ: Energetický regulační úřad. *Sluneční elektrárny: stav k 30.9.2016* [online]. Praha, 2016 [cit. 2016-11-20]. Dostupné z: https://www.eru.cz/documents/10540/463106/SLE_16_09.pdf/c62a9172-dd89-421f-9403-5ab505342370

- [34] European Commission: Joint research centre. *Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS)* [online]. Ispra, 2012 [cit. 2017-01-02]. Dostupné z: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/index.htm>
- [35] EZÚ: Elektrotechnický zkušební ústav. *Prohlášení o shodě: CE* [online]. Praha [cit. 2016-12-21]. Dostupné z: <http://ezu.cz/produkty/prohlaseni-o-shode-ce>.
- [36] HRDÝ, Milan a Michaela KRECHOVSKÁ. *Finance podniku*. Praha: Wolters Kluwer Česká republika, 2009. ISBN 978-80-7357-492-5.
- [37] CHMEL, Ladislav a Ivo HAMERNÍK. *Fotovoltaika, Fototermika: Podpora přírodovědného a technického vzdělávání na středních školách v Jihomoravském kraji* [online]. 2015 [cit. 2016-12-13]. ISBN 978-80-88058-02-1. Dostupné z: <https://publi.cz/books/91/02.html>
- [38] IEA: International Energy Agency. *Final Consumption 2014: World* [online]. Paříž, 2015 [cit. 2016-11-20]. Dostupné z: [https://www.iea.org/Sankey/#?c=World&s=Final consumption](https://www.iea.org/Sankey/#?c=World&s=Final%20consumption)),
- [39] Institution of Mechanical Engineers. *Top 10 largest solar photovoltaic plants in the world* [online]. Londýn, 2016 [cit. 2016-11-24]. Dostupné z: <http://www.imeche.org/news/news-article/top-10-solar-photovoltaic-plants-in-the-world>
- [40] IRENA: International Renewable Energy Agency. *Featured Dashboard - Capacity and Generation: World Overview* [online]. Masdar City, 2016 [cit. 2016-11-24]. Dostupné z: <http://resourceirena.irena.org/gateway/dashboard/?topic=4&subTopic=17>
- [41] KUSALA, Jaroslav. *Solární energie: Miniencyklopedie/ sešit č. 7* [online]. Simopt, 2013 [cit. 2016-11-30]. ISBN 978-80-87851-16-6. Dostupné z: https://www.cez.cz/edee/content/miniencyklopedie/7_miniencyklopedie_solarni_energie/cs/index.html#fc89a88812
- [42] LA MANNA, Damiano a Vincenzo LI VIGNI. *Renewable and Sustainable Energy Reviews: Reconfigurable electrical interconnection strategies for photovoltaic arrays: A review* [online]. 33. Elsevier B.V, 2014 [cit. 2016-12-13]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.techlib.cz/science/article/pii/S1364032114000926>
- [43] LIBRA, Martin a Vladislav POULEK. *Fotovoltaika: teorie i praxe využití solární energie*. 2., dopl. vyd. Praha: Ilsa, 2010. ISBN 978-80-904311-5-7.
- [44] MASTNÝ, Petr. *Obnovitelné zdroje elektrické energie*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04937-2.
- [45] MathWorks. *400-kW Grid-Connected PV Farm (Average Model)* [online]. Natick [cit. 2017-01-02]. Dostupné z: https://www.mathworks.com/examples/simpower/mw/sps_product-power_4PVarray_400kW-400-kw-grid-connected-pv-farm-average-model
- [46] MathWorks. *Simulink* [online]. Natick [cit. 2017-01-02]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/products/simulink.html>
- [47] MATUŠKA, Tomáš. *Solární zařízení v příkladech*. Praha: Grada, 2013. Stavitel. ISBN 978-80-247-3525-2.
- [48] MERTENS, Konrad. *Photovoltaik - Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis* [online]. 3. Mnichov: Carl Hanser, 2015 [cit. 2016-12-22]. ISBN 978-3-446-44232-0.
- [49] Ministerstvo průmyslu a obchodu. *Státní energetická koncepce České republiky*. Praha, 2015.

- [50] MyElectrical Engineering. *Photovoltaic (PV) - Electrical Calculations* [online]. [cit. 2016-12-22]. Dostupné z: <http://myelectrical.com/notes/entryid/225/photovoltaic-pv-electrical-calculations>
- [51] NASA: Atmospheric science data centre. *NASA Surface meteorology and Solar Energy: Global Data Sets: Global Horizontal Radiation (kWh/m²/day)* [online]. Hampton, 2008 [cit. 2016-12-21]. Dostupné z: https://eosweb.larc.nasa.gov/sse/global/text/global_radiation
- [52] Nová zelená úsporám. *Podmínky oblasti podpory C: Podoblasti C.1 a C.2 - Výměna zdrojů tepla* [online]. Praha, 2015 [cit. 2016-11-30]. Dostupné z: <http://www.novazelenausporam.cz/zadatele-o-dotaci/rodinne-domy/3-vyzva-rodinne-domy/podminky-oblasti-podpory-c-3-vyzva/>
- [53] OEnergetice.cz. *Co je ENERGIEWENDE a jaké jsou její cíle?* [online]. Praha: Praha, 2015 [cit. 2016-11-18]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/obnovitelne-zdroje/energie-wende-a-jejji-cile/>
- [54] OEZ s.r.o. *Obecné schéma FV zdroje pracujícího paralelně s distribuční sítí* [online]. Letohrad [cit. 2016-12-13]. Dostupné z: http://www.oez.cz/uploads/obrazky/novinky/Fotovoltaika_graf.jpg
- [55] OTE, a.s.: Operátor trhu s elektřinou [online]. Praha [cit. 2017-01-02]. Dostupné z: <http://www.ote-cr.cz/>
- [56] POWER EXCHANGE CENTRAL EUROPE, a.s. [online]. Praha [cit. 2017-01-02]. Dostupné z: <https://www.pxe.cz/>
- [57] PV Magazine: Photovoltaic Market & Technology. *France's 300 MW Cestas solar plant inaugurated* [online]. Berlin: pv magazine group GmbH & Co., 2015 [cit. 2016-11-24]. Dostupné z: http://www.pv-magazine.com/news/details/beitrag/frances-300-mw-cestas-solar-plant-inaugurated_100022247/#axzz4QwXE5ytK
- [58] PVEducation.org. *Air mass* [online]. [cit. 2017-01-02]. Dostupné z: <http://www.pveducation.org/pvcdrom/2-properties-sunlight/air-mass>
- [59] PVEducation.org. *Nominal Operating Cell Temperature* [online]. [cit. 2017-01-02]. Dostupné z: <http://www.pveducation.org/pvcdrom/modules/nominal-operating-cell-temperature>
- [60] RD Solar. *SOLÁRNÍ PANELE* [online]. Ústí nad Labem [cit. 2016-12-13]. Dostupné z: <http://www.rdsolar.cz/sluzby/solarni-panely/>
- [61] Science Daily. *Solar Energy News* [online]. Rockville: Science Daily [cit. 2016-12-13]. Dostupné z: https://www.sciencedaily.com/news/matter_energy/solar_energy/
- [62] Severní energetická a.s. *Eelektrárna Chvaletice* [online]. Most [cit. 2016-11-20]. Dostupné z: <http://www.sev-en.cz/cz/elektrina/elektrarna-chvaletice.html>
- [63] SINO VOLTAICS. *Islanding-what is it and how to protect from it* [online]. Hong Kong, 2015 [cit. 2016-12-13]. Dostupné z: <http://sinovoltaics.com/learning-center/system-design/islanding-protection/>
- [64] SINO VOLTAICS. *PV Junction Box: purpose and connection* [online]. Hong Kong, 2011 [cit. 2016-12-13]. Dostupné z: <http://sinovoltaics.com/learning-center/materials/pv-junction-box-purpose-and-connection/>
- [65] SMA SOLAR TECHNOLOGY AG. *SUNNY CENTRAL 500CP XT / 630CP XT / 720CP XT / 760CP XT* [online]. Niestetal [cit. 2017-01-02]. Dostupné z: <http://www.sma.de/en/products/solarinverters/sunny-central-500cp-xt-630cp-xt-720cp-xt-760cp-xt.html>

- [66] SMĚRNICE EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY 2001/77/ES ze dne 27. září 2001 o podpoře elektřiny vyrobené z obnovitelných zdrojů energie na vnitřním trhu s elektřinou. In: *Úřední věstník Evropské unie*. 2011, ročník 2001.
- [67] SMIL, Vaclav. *Fakta a mýty o energetice: jak vrátit debatu o energetice zpátky na zem*. Vyd. 1. české. Ostrava: Moravskoslezský dřevařský klastr ve spolupráci s Moravskoslezským energetickým klastrem a Výzkumným energetickým centrem VŠB-TU, 2013. ISBN 978-80-905447-0-3.
- [68] Solar Designs. *Peak Sun Hours* [online]. [cit. 2017-01-02]. Dostupné z: <http://www.solar-designs.com.au/thedetails.shtml>
- [69] Solar Updraft Tower. *Solar Updraft Tower: Principle* [online]. Stuttgart: Schlaich Bergermann Solar [cit. 2016-11-30]. Dostupné z: <http://www.solar-updraft-tower.com/concept/principle/>
- [70] Solární energie. *Mapa slunečního záření* [online]. [cit. 2016-11-19]. Dostupné z: <http://www.solarni-energie.info/img/mapa-slunecniho-zareni.jpg>
- [71] STARÝ, Oldřich. *Studijní materiály k předmětu A1B16UFI: Rozhodovací metody pro výběr investic*. Praha: ČVUT, 2010.
- [72] Stavebnictví3000.cz. *Úhel dopadu slunečních paprsků na vodorovnou rovinu, střechu a fasádu* [online]. Vega [cit. 2017-01-02]. Dostupné z: <http://www.stavebnictvi3000.cz/vypocty/3-uhel-dopadu-slunecnich-paprsku-na-vodorovnou/?do=calcForm-submit>
- [73] Stirlingův motor. *Princip strilingova motoru* [online]. Dolní Životice [cit. 2016-11-30]. Dostupné z: <http://stirlingmotor.cz/princip.html>
- [74] SunPower. *E-Series Solar Panels* [online]. San Jose [cit. 2017-01-02]. Dostupné z: <https://us.sunpower.com/solar-panels-technology/e-series-solar-panels/>
- [75] SÝKORA, Tomáš. *Studijní matriály k předmětu A0M15EZS – Elektrické zdroje a soustavy: Rozptýlená (decentralizovaná) výroba elektrické energie*. Praha: ČVUT, 2010.
- [76] The Guardian. *MIT nuclear fusion record marks latest step towards unlimited clean energy* [online]. London, The United Kingdom: Guardian News and Media Limited, 2016 [cit. 2016-11-18]. Dostupné z: <https://www.theguardian.com/environment/2016/oct/17/mit-nuclear-fusion-record-marks-latest-step-towards-unlimited-clean-energy>
- [77] The Pennsylvania State University: The College of Earth and Mineral Sciences. *Spectre of Solar Radiation* [online]. Pennsylvania, 2015 [cit. 2016-11-18]. Dostupné z: <https://www.e-education.psu.edu/earth103/sites/www.e-education.psu.edu/earth103/files/module03/fig11in.png>
- [78] TZB-info. *Fotovoltaika - jaká je nejlepší dostupná technologie?* [online]. Praha: Topinfo, 2010 [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/6327-fotovoltaika-jaka-je-nejlepsi-dostupna-technologie>
- [79] TZB-info. *Průměrné měsíční doby slunečního svitu ve vybraných lokalitách ČR* [online]. Praha: Topinfo [cit. 2016-11-24]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/99-prumerne-mesicni-doby-slunecniho-svitu-ve-vybranych-lokalitach-cr>
- [80] TZB-info. *Stručná historie fotovoltaiky* [online]. Praha: Topinfo, 2014 [cit. 2016-11-18]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/11652-strucna-historie-fotovoltaiky>
- [81] TZB-info. *Struktura fotovoltaického článku* [online]. Praha: Topinfo s.r.o, 2014 [cit. 2016-12-22]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/docu/clanky/0117/011772o1.png>
- [82] United Nations: *Kjótský protokol k Rámcové úmluvě OSN o změně klimatu*. In: . Kyoto: OSN, 1997. Dostupné také z:

- [http://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/kjotsky_protokol/\\$FILE/OMV-cesky_protokol-20081120.pdf](http://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/kjotsky_protokol/$FILE/OMV-cesky_protokol-20081120.pdf)
- [83] ÚNMZ: Úřad pro normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. *Seznam ČSN* [online]. Praha [cit. 2016-12-21]. Dostupné z: <http://seznamcsn.unmz.cz/>
- [84] VÁPENÍK, René. *Vliv fotovoltaických elektráren na provoz distribuční soustavy*. Elektrotechnika [online]. 2011, **2011**(Svazek 13 ; Číslo 3), 26-1 až 26-7 [cit. 2016-12-13]. ISSN 1213 - 1539. Dostupné z: <http://www.elektrotechnika.cz/cz/clanky/energetika--vykonova-elektronika--elektrotechnologie/0/vliv-fotovoltaickych-elektraren-na-provoz-distribucni-soustavy/>
- [85] Vítejte na zemi: multimediální ročenka životního prostředí. *Rozbití atomu* [online]. Praha: CENIA, 2013 [cit. 2016-12-22]. Dostupné z: http://www.vitejtenazemi.cz/cenia/index.php?p=rozbiti_atomu&site=energie
- [86] VOŽENÍLEK, Petr, Vladimír NOVOTNÝ a Pavel MINDL. *Elektromechanické měniče*. 2. vyd. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04875-7.
- [87] Vyhláška č. 415/2012 Sb., o přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší. In: *Sbírka zákonů*. Praha, 2012, ročník 2012, 151 a násl.
- [88] Vyhláška č. 82/2011 Sb., o měření elektřiny a o způsobu stanovení náhrady škody při neoprávněném odběru, neoprávněné dodávce, neoprávněném přenosu nebo neoprávněné distribuci elektřiny. In: *Sbírka zákonů*. Praha, 2011, částka 31.
- [89] Wikipedia: the free encyclopedia *Seznam největších fotovoltaických elektráren v Česku*. [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-11-23]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Seznam_nejv%C4%9Bt%C5%A1%C3%ADch_fotovoltaick%C3%BDch_elektr%C3%A1ren_v_%C4%8Cesku
- [90] Zákon č. 165/2012 Sb. o podporovaných zdrojích energie a o změně některých zákonů. In: *Sbírka zákonů*. 2012, ročník 2012, 59 a násl.
- [91] Zákon č. 180/2005 Sb., o podpoře výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů energie a o změně některých zákonů (zákon o podpoře využívání obnovitelných zdrojů). In: *Sbírka zákonů*. Praha, 2005, ročník 2005, 66 a násl.
- [92] Zákon č. 201/2012 Sb. Zákon o ochraně ovzduší. In: *Sbírka Zákonů*. Praha, 2012, ročník 2012, 69 a násl.
- [93] Zákon č. 346/2010 Sb. Zákon, kterým se mění zákon č. 586/1992 Sb., o daních z příjmů, ve znění pozdějších předpisů, a další související zákony. In: *Sbírka zákonů*. Praha, 2010, ročník 2005, 127 a další.
- [94] Zákon č. 458/2000 Sb., o podmínkách podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích a o změně některých zákonů (energetický zákon). In: *Sbírka zákonů*. Praha, 2000, ročník 2000, 131 a násl.

Seznam obrázků

Obrázek 1: Vývoj instalovaného výkonu v ČR k 31. 12. 2015	6
Obrázek 2: Vývoj výroby elektřiny brutto v ČR dle zdrojů	7
Obrázek 3: Vývoj počtu slunečních elektráren v ČR.....	9
Obrázek 4: Spektrum slunečního záření.....	18
Obrázek 5: Izokřivky průměrné ho ročního úhrnu globální energie pro ČR.....	20
Obrázek 6: Obecné schéma FV zdroje pracujícího paralelně s distribuční sítí	22
Obrázek 7: Struktura fotovoltaického článku	24
Obrázek 8: Obecná voltampérová charakteristika fotovoltaického článku	25
Obrázek 9: Závislost Voltampérových charakteristik na intenzitě ozáření.....	25
Obrázek 10: Závislost výkonových křivek FV článku na intenzitě ozáření.....	26
Obrázek 11: Závislost V-A charakteristiky a výkonové charakteristika FV článku na teplotě	27
Obrázek 12: Složení fotovoltaického panelu	28
Obrázek 13: Typické konfigurace zapojení střídačů: (a) Centrální, (b) Single string, (c) Multi string, (d) Modulové zapojení [42]	32
Obrázek 14: Profil nosné konstrukce	41
Obrázek 15: Navržený půdorys fotovoltaické elektrárny.....	42
Obrázek 16: Matematický model fotovoltaické elektrárny	44
Obrázek 17: Funkční celek fotovoltaické elektrárny	44
Obrázek 18: Část modelu s fotovoltaickými poli.....	45
Obrázek 19: Dodávaný výkon jedním polem	46
Obrázek 20: Zadané hodnoty pro jedno fotovoltaické pole.....	46
Obrázek 21: Část modelu s měniči.....	47
Obrázek 22: Část modelu s meziobvodem	48
Obrázek 23: Schéma distribuční soustavy.....	48
Obrázek 24: Dodávané výkony jedním celkem. Červená (Q), Modrá (P)	49
Obrázek 25 : Znázornění doby slunečního maxima [68]	49
Obrázek 26: Výsledky z výpočtového programu PVGIS.....	53
Obrázek 27: Citlivostní analýza závislosti NPV na míře inflace a výši požadovaného diskontu	68
Obrázek 28: Citlivostní analýza závislosti NPV na výkupní ceně 1 MWh.....	69
Obrázek 29: Citlivostní analýza závislosti NPV na ceně fotovoltaického panelu	70

Seznam tabulek

Tabulka 1: Seznam největších uhelných elektráren na území ČR	5
Tabulka 2: Seznam největších fotovoltaických elektráren v ČR	8
Tabulka 3: Výkonové a výrobní podíly kategorií FVE v ČR v roce 2015	9
Tabulka 4: Státy s největším instalovaným výkonem FVE na světě v roce 2015	10
Tabulka 5: Platné garantované výkupní ceny a zelené bonusy pro rok 2016	13
Tabulka 6: Systémové ztráty	51
Tabulka 7: Výpočtová tabulka pro určení množství vyrobené elektřiny	52
Tabulka 8: Investiční výdaje modelového příkladu	60
Tabulka 9: Provozní výdaje modelového příkladu	61
Tabulka 10: Příjmy modelového příkladu	62
Tabulka 11: Ekonomické ukazatele modelového příkladu	63
Tabulka 12: Parametry pro daňové odpisy modelového příkladu	63
Tabulka 13: Meziroční růst cenových hladin	64
Tabulka 14: Rozpis výpočtu NPV - 1. část	65
Tabulka 15: Rozpis výpočtu NPV - 2. část	66
Tabulka 16: Kritéria pro hodnocení výnosnosti investičních projektů	67
Tabulka 17: Mezní podmínky aby $NPV = 0$	71

Seznam příloh

Příloha 1: Datasheet fotovoltaického panelu	83
Příloha 2 : Datasheet střídače.....	84
Příloha 3: Průběhy elektrických veličin v jednotlivých částech modelu.....	85

Příloha 1: Datasheet fotovoltaického panelu

SUNPOWER

E20/435 SOLAR PANEL

MODEL: SPR-435NE-WHT-D

ELECTRICAL DATA

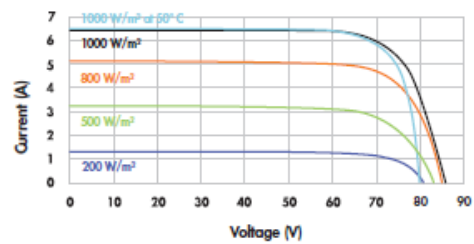
Measured at Standard Test Conditions (STC): irradiance of 1000 W/m², AM 1.5, and cell temperature 25° C

Peak Power (+/- 5%)	P _{max}	435 W
Cell Efficiency	η	22.5 %
Panel Efficiency	η	20.1 %
Rated Voltage	V _{mpp}	72.9 V
Rated Current	I _{mpp}	5.97 A
Open-Circuit Voltage	V _{oc}	85.6 V
Short-Circuit Current	I _{sc}	6.43 A
Maximum System Voltage	UL	600 V
Temperature Coefficients	Power (P)	- 0.38%/K
	Voltage (V _{oc})	- 235.5 mV/K
	Current (I _{sc})	3.5 mA/K
NOCT		45° C +/- 2° C
Series Fuse Rating		20 A
Grounding		Positive grounding not required

MECHANICAL DATA

Solar Cells	128 SunPower Maxeon™ cells
Front Glass	High-transmission tempered glass with anti-reflective (AR) coating
Junction Box	IP-65 rated with 3 bypass diodes Dimensions: 32 x 155 x 128 mm
Output Cables	700 mm cables / Multi-Contact (MC4) connectors
Frame	Anodized aluminum alloy type 6063 (silver); stacking pins
Weight	56.0 lbs. (25.4 kg)

I-V CURVE



Current/voltage characteristics with dependence on irradiance and module temperature.

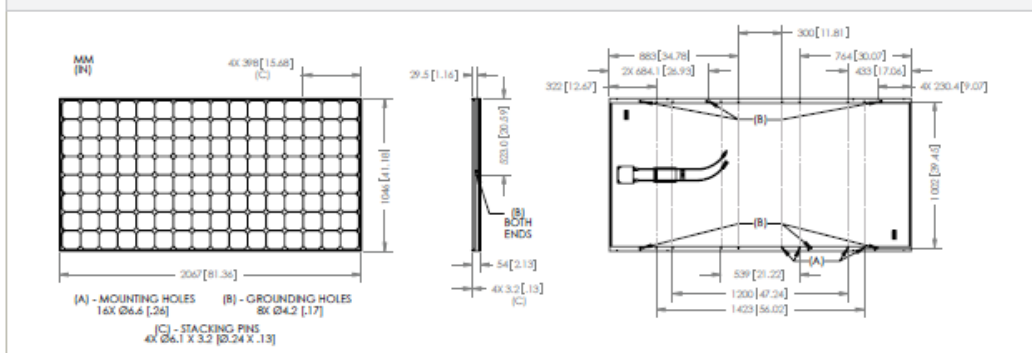
TESTED OPERATING CONDITIONS

Temperature	- 40° F to +185° F [- 40° C to + 85° C]
Max load	113 psf 550 kg/m ² (5400 Pa), front (e.g. snow) w/specified mounting configurations 50 psf 245 kg/m ² (2400 Pa) front and back (e.g. wind)
Impact Resistance	Hail: (25 mm) at 51 mph (23 m/s)

WARRANTIES AND CERTIFICATIONS

Warranties	25-year limited power warranty 10-year limited product warranty
Certifications	Tested to UL 1703. Class C Fire Rating

DIMENSIONS



Please read safety and installation instructions before using this product, visit sunpowercorp.com for more details.

© 2011 SunPower Corporation. SUNPOWER, the SunPower Logo, and THE WORLD'S STANDARD FOR SOLAR, and MAXEON are trademarks or registered trademarks of SunPower Corporation in the US and other countries as well. All Rights Reserved. Specifications included in this datasheet are subject to change without notice.

sunpowercorp.com
Document #00145754 Rev "A" / ITR_EN
CS 11, 2010

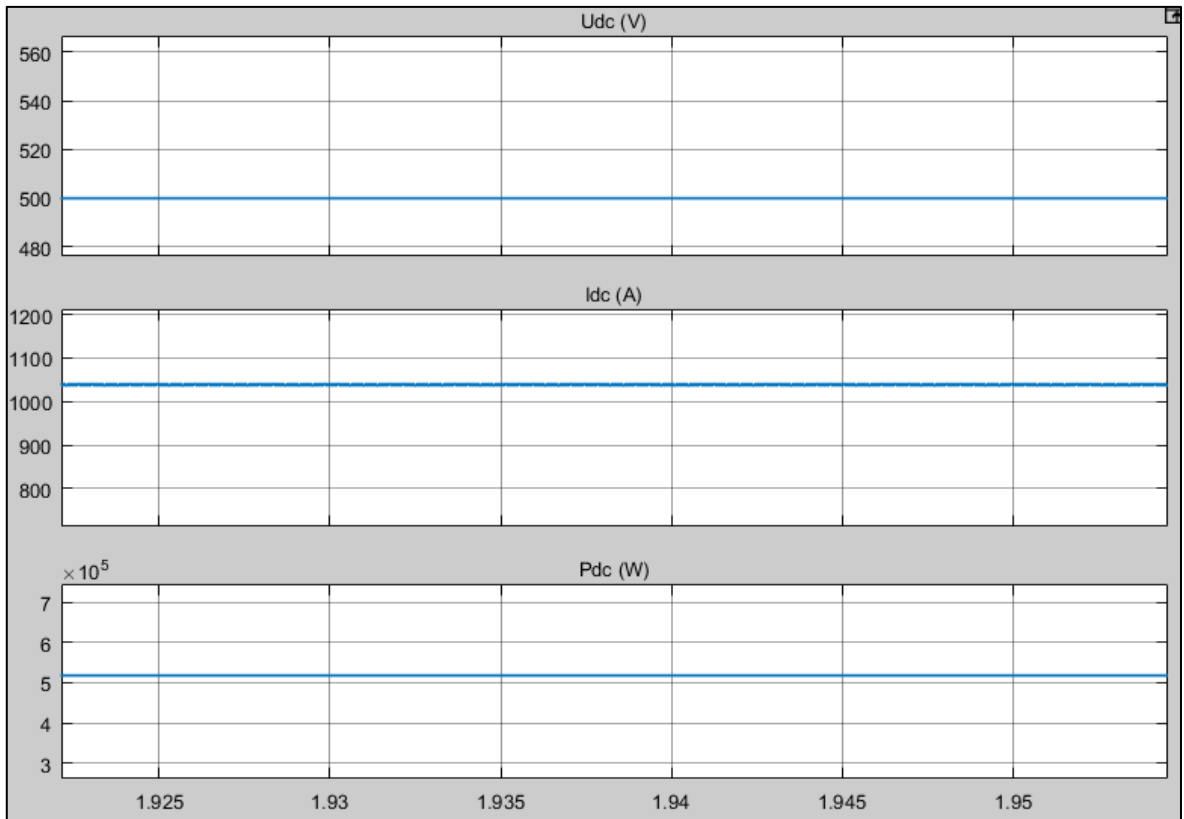
Příloha 2 : Datasheet střídače

SUNNY CENTRAL 500CP XT / 630CP XT / 720CP XT / 760CP XT

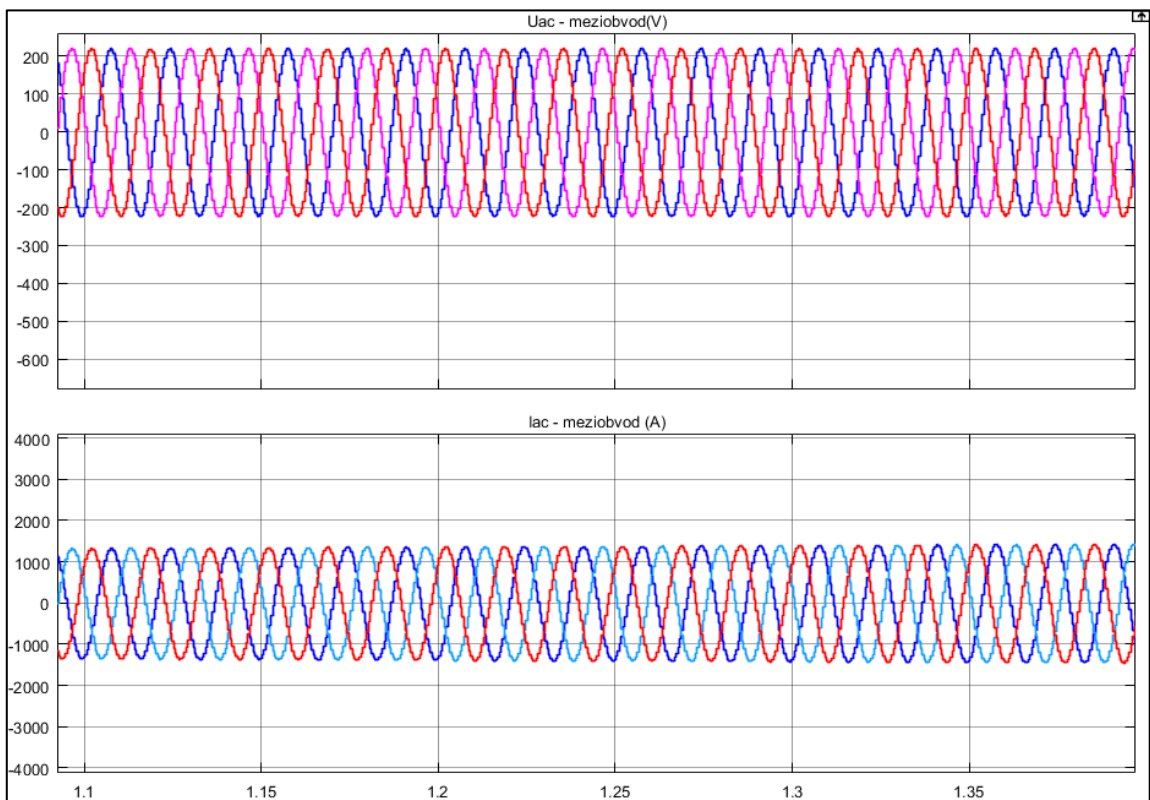
Technical Data	Sunny Central 500CP XT	Sunny Central 630CP XT
Input (DC)		
Max. DC power (@ $\cos \varphi = 1$)	560 kW	713 kW
Max. input voltage	1,000 V	1,000 V
V_{MPPT} at $I_{MPPT} < I_{DCmax}$	430 V	500 V
MPP voltage range (@ 25°C / @ 50°C at 50 Hz) ^{1,2}	449 to 850 V / 430 to 850 V	529 to 850 V / 500 to 850 V
MPP voltage range (@ 25°C / @ 50°C at 60 Hz) ^{1,2}	449 to 850 V / 436 to 850 V	529 to 850 V / 505 to 850 V
Rated input voltage	449 V	529 V
Max. input current	1,250 A	1,350 A
Max. DC short-circuit current	2,500 A	2,500 A
Number of independent MPP inputs	1	1
Number of DC inputs	9	9
Output (AC)		
Rated power (@ 25°C) / nominal AC power (@ 50°C)	550 kVA / 500 kVA	700 kVA / 630 kVA
Nominal AC voltage / nominal AC voltage range	270 V / 243 V to 310 V	315 V / 284 V to 362 V
AC power frequency / range	50 Hz, 60 Hz / 47 Hz to 63 Hz	50 Hz, 60 Hz / 47 Hz to 63 Hz
Rated power frequency / rated grid voltage	50 Hz / 270 V	50 Hz / 315 V
Max. output current / max. total harmonic distortion	1,176 A / 1,238 A ³ / 0,03	1,283 A / 1,350 A ³ / 0,03
Power factor at rated power / displacement power factor adjustable	1 / 0.9 leading to 0.9 lagging	
Feed-in phases / connection phases	3 / 3	3 / 3
Efficiency⁴		
Max. efficiency / European efficiency / CEC efficiency	98,6% / 98,4% / 98,5%	98,7% / 98,5% / 98,5%
Protective devices		
Input-side disconnection device	Motor-driven load-break switch	Motor-driven load-break switch
Output-side disconnection device	AC circuit breaker	AC circuit breaker
DC overvoltage protection	Type I surge arrester	Type I surge arrester
Lightning protection (according to IEC 62305-1)	Lightning Protection Level III	Lightning Protection Level III
Stand-alone grid detection active / passive	● / –	● / –
Grid monitoring	●	●
Ground fault monitoring / remote-controlled ground fault monitoring	○ / ○	○ / ○
Insulation monitoring	○	○
Surge arrester for auxiliary power supply	●	●
Protection class (according to IEC 62103) / overvoltage category (according to IEC 60664-1)	I / III	I / III
General data		
Dimensions (W / H / D)	2,562 / 2,272 / 956 mm (101 / 89 / 38 inches)	
Weight in kg	1,900 kg / 4,200 lb	1,900 kg / 4,200 lb
Operating temperature range	–25°C to 62°C / –13°F to 144°F	
Extended operating temperature range	○ [–40°C to 62°C / –40°F to 144°F]	
Noise emission ⁵	63 dB(A)	64 dB(A)
Max. self-consumption (operation) ⁶ / self-consumption (night)	1,900 W / < 100 W	1,900 W / < 100 W
External auxiliary supply voltage	230 V / 400V (3 / N / PE)	230 V / 400V (3 / N / PE)
Cooling concept	OptiCool	OptiCool
Degree of protection: electronics / connection area (according to IEC 60529) / according to IEC 60721-3-4	IP54 / IP43 / 4C2, 4S2	IP54 / IP43 / 4C2, 4S2
Application in unprotected outdoor environments / indoor	● / ○	● / ○
Maximum permissible value for relative humidity (non-condensing)	15% to 95%	15% to 95%
Maximum operating altitude above MSL 2,000 m / 4,000 m	● / ○	● / ○
Fresh air consumption (inverter)	3,000 m ³ /h	3,000 m ³ /h
Features		
DC connection / AC connection	Ring terminal lug / ring terminal lug	
Display	HMI touch display	
Communication / protocols	Ethernet (optical fiber optional), Modbus	
DC current monitoring (Zone monitoring / String monitoring)	○ / ○	
SC-COM / Plant monitoring	● / ○ (via Sunny Portal)	
Color enclosure / door / base / roof	RAL 9016 / 9016 / 7004 / 7004	
Guarantee: 5 / 10 / 15 / 20 / 25 years	● / ○ / ○ / ○ / ○	
Configurable grid management functions	Power reduction, reactive power setpoint, dynamic grid support (e.g. LVRT)	
Certificates and approvals (more available on request)	EN 61000-6-2, EN 61000-6-4, EMC-conformity, CE-conformity, BDEW-MSRL / FGW / TR8, Arrêté du 23/04/08, R.D. 1663 / 2000, R.D. 661 / 2007, P.O. 12.3 / IEEE 1547 ⁷	
● Standard features ○ Optional features – Not available		
Type designation	SC 500CP-10	SC 630CP-10

Příloha 3: Průběhy elektrických veličin v jednotlivých částech modelu

Ustálený průběh napětí, proudu a výkonu na vstupu střídače v 1 celku



Ustálený průběh napětí a proudu v meziobvodě v 1 celku



Ustálený průběh napětí a proudu v předávacím místě se sítě pro 1 celek

