

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

---

Fakulta elektrotechnická  
Katedra elektroenergetiky

# DIPLOMOVÁ PRÁCE

Návrh fotovoltaické elektrárny

Autor práce: **Bc. Jakub Turek**  
Vedoucí práce: Ing. Milan Bělík, Ph.D.

---

2024

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2023/2024

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Jakub TUREK**  
Osobní číslo: **E22N0018K**  
Studijní program: **N0714A060017 Aplikovaná elektrotechnika**  
Téma práce: **Návrh fotovoltaické elektrárny**  
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky**

## Zásady pro vypracování

1. Popište základní komponenty moderní fotovoltaické elektrárny, jejich vlastnosti a funkci.
2. Stanovte základní parametry FV elektrárny v modelovém místě s ohledem na připojitelnost a vlastní spotřebu objektu.
3. Navrhněte modelovou FV elektrárnu s dodržением zásad elektrické bezpečnosti, ochrany před úderem blesku a požární bezpečnosti.
4. Zvolené řešení zhodnoťte z technického a ekonomického hlediska.

Rozsah diplomové práce: **40-60**  
Rozsah grafických prací:  
Forma zpracování diplomové práce: **elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. Libra, Martin; Poulek, Vladislav: Fotovoltaika, Teorie i praxe využití solární energie. ILSA, Praha, 2009.
2. Matuška, Tomáš: Solární zařízení v příkladech. Grada, 2012, 2022.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Milan Bělík, Ph.D.**  
Katedra elektroenergetiky

Datum zadání diplomové práce: **6. října 2023**  
Termín odevzdání diplomové práce: **24. května 2024**



*Zdeněk Peroutka*  
L.S.

**Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.**  
děkan

*Karel Noháč*

**Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.**  
vedoucí katedry

V Plzni dne 6. října 2023

## **Abstrakt**

Diplomová práce se zabývá návrhem fotovoltaické elektrárny. Cílem práce je navrhnout parametry fotovoltaické elektrárny tak, aby bylo využití vyrobené elektrické energie co nejefektivnější s ohledem na připojitelnost do distribuční sítě a na ekonomické hledisko. Na začátku práce jsou nejdříve popsány jednotlivé komponenty fotovoltaické elektrárny a následně je zde uvedeno rozdělení fotovoltaických systémů. Hlavní částí diplomové práce je určení zátěžového profilu objektu v modelovém místě, podle kterého je poté navržen optimální výkon fotovoltaické elektrárny. Následuje návrh a výběr vhodného typu fotovoltaického systému. Tyto systémy jsou poté porovnány jak z energetického, tak i z ekonomického hlediska. Na konci práce je navržená fotovoltaická elektrárna zhodnocena z hlediska připojitelnosti do distribuční sítě a z hlediska technického provedení, které obsahuje zásady elektrické bezpečnosti, požární bezpečnosti a ochrany před úderem blesku.

## **Klíčová slova**

Fotovoltaická elektrárna, fotovoltaický systém, fotovoltaické moduly, střídač, on-grid, hybrid, baterie, akumulace přebytečné energie, ohřev teplé užitkové vody, zátěžový profil, modelové místo, návrh, výkon, string, PVsyst, návratnost, připojitelnost, elektrická bezpečnost, požární bezpečnost, ochrana před úderem blesku.

## **Abstract**

This master's thesis focuses on the design of a photovoltaic power plant. The aim of the work is to design the parameters of the photovoltaic power plant so that the use of the produced electricity is as efficient as possible with regard to connectivity to the distribution network and economic point of view. At the beginning of the work, the individual components of the photovoltaic power plant are described, followed by a classification of photovoltaic systems. The main part of the thesis involves determining the load profile of a model site, which is then used to design the optimal capacity of the photovoltaic power plant. This is followed by the design and selection of a suitable type of photovoltaic system. These systems are then compared from both an energy and economic point of view. At the end of the thesis, the designed photovoltaic power plant is evaluated in terms of connectivity to the distribution network and technical execution, which includes the principles of electrical safety, fire safety, and lightning protection.

## **Key Words**

Photovoltaic power plant, photovoltaic system, photovoltaic modules, inverter, on-grid, hybrid, battery, excess energy storage, domestic hot water heating, load profile, model site, design, power, string, PVsyst, return on investment, connectivity, electrical safety, fire safety, lightning protection.

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Milanu Bělíkovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a za věnovaný čas ohledně konzultací. Dále bych rád poděkoval Bc. Petru Bažatovi ze společnosti EG.D. za poskytnuté materiály.

# Obsah

Seznam obrázků.....	- 2 -
Seznam tabulek.....	- 3 -
Úvod .....	- 4 -
1 Základní komponenty fotovoltaické elektrárny.....	- 6 -
1.1 Fotovoltaické moduly .....	- 6 -
1.1.1 Fotovoltaický jev .....	- 7 -
1.1.2 Typy fotovoltaických článků .....	- 8 -
1.1.3 Konstrukce fotovoltaických modulů .....	- 10 -
1.1.4 Parametry FV modulů .....	- 12 -
1.1.5 Vliv klimatických parametrů na výkon FV článku .....	- 14 -
1.1.6 Optimální sklon a orientace FV modulů.....	- 17 -
1.2 Fotovoltaický střídač .....	- 18 -
1.2.1 Vlastnosti střídače .....	- 19 -
1.3 Akumulátory.....	- 21 -
1.3.1 Olověné akumulátory .....	- 21 -
1.3.2 Lithium-iontové akumulátory.....	- 22 -
1.3.3 Regulátory dobíjení .....	- 23 -
1.4 Kabely a elektroinstalační materiál .....	- 24 -
1.5 Regulátor pro akumulaci přebytečné energie .....	- 25 -
2 Typy fotovoltaických systémů .....	- 27 -
2.1 Ostrovní (off-grid) fotovoltaický systém.....	- 27 -
2.2 On-grid fotovoltaický systém .....	- 28 -
2.3 Hybridní fotovoltaický systém .....	- 30 -
3 Stanovení parametrů FV elektrárny v modelovém místě .....	- 32 -
3.1 Modelové místo .....	- 32 -
3.1.1 Průměrná teplota a srážky, sluneční svit .....	- 34 -
3.1.2 Zátěžový profil domu v modelovém místě.....	- 35 -
3.2 Určení základní parametrů FV elektrárny .....	- 40 -
3.2.1 Výběr FV modulů a jejich vhodného rozložení.....	- 40 -

3.2.2	Výběr vhodného střídače .....	- 44 -
4	Simulace navržených variant FVE .....	- 47 -
4.1	Popis prostředí softwaru PVsyst.....	- 47 -
4.2	Stanovení optimální výkonové varianty FVE .....	- 50 -
4.3	Výběr typu FV systému.....	- 51 -
4.3.1	Porovnání on-grid a hybridního systému.....	- 52 -
4.3.2	Akumulace přebytečné energie na ohřev TUV .....	- 54 -
4.4	Finální konfigurace navržené FVE.....	- 56 -
4.4.1	Ekonomické hledisko a návratnost .....	- 56 -
4.4.2	Výsledky simulace z PVsyst .....	- 60 -
5	Připojitelnost do distribuční sítě.....	- 66 -
5.1	Konkrétní schéma sítě a výpočet připojitelnosti .....	- 66 -
6	Technické provedení FVE.....	- 72 -
6.1	Zásady elektrické bezpečnosti.....	- 72 -
6.2	Ochrana před úderem blesku .....	- 75 -
6.2.1	Návrh ochrany před úderem blesku.....	- 75 -
6.2.2	Realizace ochrany na objekty v modelovém místě .....	- 76 -
6.3	Požární bezpečnost .....	- 77 -
	Zhodnocení .....	- 78 -
	Závěr.....	- 81 -
	Literatura .....	- 82 -
	Přílohy: .....	I



## Seznam symbolů a zkratek

### Zkratky:

AC	Alternating current
AM	Air Mass
BMS	Battery Management System
ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav
ČR	Česká republika
DC	Direct current
DoD	Depth of Discharge
DPH	Daň z přidané hodnoty
EMR	Elektroměrový rozvaděč
FV	Fotovoltaický
FVE	Fotovoltaická elektrárna
HDO	Hromadné dálkové ovládání
HDR	Hlavní domovní rozvaděč
LFP	Lithium-železo-fosfátový
MPP	Maximum Power Point
MPPT	Maximum Power Point Tracker
NOCT	Nominal Operating Cell Temperature
PPDS	Pravidla provozování distribuční soustavy
PR	Perfection ratio
SOC	State Of Charge
SSR	Solid State Relay
STC	Standart Test Conditions
TUV	Teplá užitková voda
UV	Ultrafialové
V-A	Voltampérová

### Elektrické veličiny:

$I$	A	elektrický proud
$U$	V	elektrické napětí
$P$	W	elektrický výkon
$\eta$	%	účinnost
$E$	$W \cdot m^{-2}$	intenzita slunečního záření
FF	-	činitel plnění

### Obecné veličiny:

t	°C	teplota
v	$m \cdot s^{-1}$	rychlost

## Seznam obrázků

Obrázek 1.1: Porovnání struktury monokrystalického, polykrystalického a tenkovrstvého článku (převzato z [19] a upraveno).....	- 10 -
Obrázek 1.2: Konstrukce FV modulu.....	- 11 -
Obrázek 1.3: V-A charakteristika a výkonová charakteristika FV článku.....	- 12 -
Obrázek 1.4: V-A charakteristika FV článku v závislosti na intenzitě osvětlení.....	- 15 -
Obrázek 1.5: V-A charakteristika FV článku v závislosti na teplotě.....	- 16 -
Obrázek 1.6: Procentní výnos energie v závislosti na orientaci a sklonu FV modulu (převzato z [16]).....	- 17 -
Obrázek 1.7: Závislost účinnosti střídače na výstupním výkonu (převzato z [20]).....	- 20 -
Obrázek 2.1: Blokové schéma ostrovního (off-grid) systému.....	- 28 -
Obrázek 2.2: Blokové schéma on-grid systému.....	- 29 -
Obrázek 2.3: Blokové schéma hybridního systému.....	- 31 -
Obrázek 3.1: Výstrižek z mapových podkladů modelového místa včetně rozměrů jednotlivých střech.....	- 33 -
Obrázek 3.2: Sluneční mapa ČR.....	- 35 -
Obrázek 3.3: Denní zátěžový profil modelového místa.....	- 38 -
Obrázek 3.4: Optimalizovaný denní zátěžový profil modelového místa.....	- 40 -
Obrázek 3.5: Porovnání průběhů idealizované výroby na jednotlivých střechách.....	- 41 -
Obrázek 4.1: Úvodní stránka projektu v softwaru PVsyst.....	- 49 -
Obrázek 4.2: Grafické porovnání ekonomiky FVE bez dotace a FVE s dotací.....	- 59 -
Obrázek 4.3: Porovnání teoretického průběhu výroby navržené FVE se zátěžovým profilem.....	- 60 -
Obrázek 4.4: 3D model modelového místa v PVsyst včetně umístění FV modulů.....	- 61 -
Obrázek 4.5: Horizont v modelovém místě pro obě orientace FV modulů.....	- 62 -
Obrázek 4.6: Ztráty a výroba FVE za jednotlivé měsíce.....	- 65 -
Obrázek 4.7: Výroba FVE za den v průběhu roku.....	- 65 -
Obrázek 5.1: Reálné schéma distribuční sítě v modelovém místě.....	- 68 -
Obrázek 5.2: Výsledek výpočtu připojitelnosti z programu Grizzly.....	- 69 -
Obrázek 5.3: Namodelovaná větev sítě v softwaru DNcalc dle reálné sítě.....	- 70 -
Obrázek 6.1: Jednopolového schéma navržené FVE.....	- 74 -

## Seznam tabulek

Tabulka 1.1: Závislost počtu cyklů na úrovni vybití olověného akumulátoru (převzato z [21]) .....	- 22 -
Tabulka 3.1: Přehled jednotlivých střech v modelovém místě.....	- 33 -
Tabulka 3.2: Tabulka klimatických podmínek v modelovém místě získané z ČHMÚ..	- 34 -
Tabulka 3.3: Seznam spotřebičů v domě s jejich výkonem a použitím .....	- 36 -
Tabulka 3.4: Spotřeba domu za jednotlivou hodinu.....	- 37 -
Tabulka 3.5: Spotřeba domu za jednotlivou hodinu - optimalizovaný zátěžový profil	- 39 -
Tabulka 3.6: Vybrané technické parametry FV modulu LONGi Solar LR5-66HTH-525M.....	- 43 -
Tabulka 3.7: Porovnání jednotlivých variant návrhu FVE.....	- 44 -
Tabulka 3.8: Zvolení výkonu střídače k jednotlivým variantám.....	- 45 -
Tabulka 3.9: Vybrané technické parametry střídače Solax Power X3-MIC G2 .....	- 46 -
Tabulka 4.1: Vybrané výsledky simulace z PVsyst pro porovnání jednotlivých variant-	50 -
Tabulka 4.2: Vybrané technické parametry baterie Triple Power T30 .....	- 52 -
Tabulka 4.3: Porovnání on-grid a hybridního systému .....	- 53 -
Tabulka 4.4: Rozpis ceny navržené fotovoltaické elektrárny dle položek.....	- 57 -
Tabulka 4.5: Porovnání ekonomického hlediska různých systémů.....	- 59 -
Tabulka 4.6: Výsledky energetických hodnot z PVsyst pro jednotlivý měsíc .....	- 63 -
Tabulka 5.1: Výsledky výpočtu připojitelnosti ze softwaru DNcalc.....	- 70 -

## Úvod

Fotovoltaické elektrárny se v posledních letech staly významnými představiteli obnovitelných zdrojů energie. Se stoupajícími nároky na snižování emisí skleníkových plynů a zvyšování energetické nezávislosti se fotovoltaika jeví jako klíčový prvek moderních energetických systémů. To lze i vidět na číslech z roku 2023, kdy se v České republice postavilo téměř 83 tisíc nových FV elektráren s výkonem téměř 1 GWp [1]. To je nárůst oproti předchozímu roku o 145 % [1]. Jedná se především o malé fotovoltaické elektrárny instalované na střechách rodinných domů, ale zvyšuje se i počet velkých firemních instalací.

Jelikož se i v praxi zabývám fotovoltaickými systémy, byl výběr této oblasti energetiky pro mou diplomovou práci více než jasný. Obnovitelné zdroje energie jsou pro mě velice zajímavým tématem, jelikož se s touto problematikou setkáváme čím dál častěji z důvodu jejich stále většího prosazování. Zároveň jsem si chtěl prohloubit znalosti o fotovoltaických systémech, především z technického hlediska včetně samotného návrhu FVE, ale i z finanční stránky včetně návratnosti. Finanční analýza je také důležitou součástí návrhu a provozu fotovoltaické elektrárny.

Cílem této práce je navrhnout parametry fotovoltaické elektrárny pro rodinný dům tak, aby bylo využití vyrobené elektrické energie z co nejefektivnější. Hlavní částí ještě před samotným návrhem FVE je stanovení vstupních parametrů, tedy stanovení zátěžového profilu objektu v modelovém místě a možnost osazení FV modulů na dostupné střechy. Při samotném návrhu se budu také zabývat, zda je využití FV systému s bateriemi výhodnější z energetického i ekonomického hlediska. Návrh bude také obsahovat zhodnocení energetického a ekonomického hlediska systému pro akumulaci přebytečné energie na ohřev TUV. Na konci ekonomického zhodnocení bude uveden vliv ceny dotace především na návratnost FV systému. Vzhledem k připojení FVE do distribuční sítě bude proveden výpočet připojitelnosti reprezentující reálnou distribuční síť v modelovém místě. Součástí práce bude také řešení technického provedení FV systému pro zajištění bezpečnosti celé instalace.

Diplomová práce je rozdělena do šesti kapitol. První kapitola se zabývá teoretickým popisem základních komponent fotovoltaické elektrárny, mezi které patří fotovoltaické moduly, střídače, akumulátory, regulátory pro akumulaci přebytečné energie a také kabely nebo

elektroinstalační materiál. Druhá kapitola obsahuje rozdělení fotovoltaických elektráren podle způsobu připojení do distribuční sítě, tedy na on-grid, off-grid a hybridní systém. Třetí kapitola se věnuje popisu modelového místa včetně stanovení zátěžového profilu objektu, který je nejvýznamnějším vstupním parametrem při návrhu FVE. Zároveň zde bylo navrženo několik výkonových variant FV elektrárny, které jsou následně porovnány ve čtvrté kapitole. Porovnání je zhodnoceno jak z energetického, tak z ekonomického hlediska. Součástí této kapitoly je i porovnání on-grid a hybridního systému a následně je určena finální konfigurace fotovoltaické elektrárny. Na konci čtvrté kapitoly jsou uvedené výsledky simulace navržené FVE v softwaru PVsyst [2]. Pátá kapitola se zabývá připojitelností FVE do distribuční sítě. Jsou zde popsány dvě metody výpočtu připojitelnosti ze dvou různých softwarů, kde jeden z výpočtů je proveden přímo technikem z EG.D. na reálné distribuční síti v modelovém místě. V poslední šesté kapitole se zaměřuji na technické řešení navrhované FVE a jeho zhodnocení z hlediska elektrické bezpečnosti, požární bezpečnosti a ochrany před úderem blesku.

# 1 Základní komponenty fotovoltaické elektrárny

U fotovoltaických elektráren dochází v posledních letech k velkému rozvoji, který přináší také inovace v technologiích jednotlivých komponent. Dnešní moderní fotovoltaická elektrárna zahrnuje velké množství prvků, jejich nasazení se liší složitostí a sofistikovaností jednotlivých fotovoltaických systémů. Inovace v technologiích se týkají jak základních komponent fotovoltaické elektrárny, tak i komponent doplňkových, které nemusí každý FV systém obsahovat.

Základní komponenty fotovoltaické elektrárny vyplývají z jednoduchého principu fotovoltaické elektrárny. Tím je myšlena přeměna slunečního záření na elektrický proud, poté přeměna tohoto elektrického stejnosměrného proudu na střídavý proud a následně jeho distribuce do místa spotřeby. Tedy těmi základními komponenty jsou fotovoltaické moduly, střídače a kabely pro přenos energie. Pro zajištění určité elektrické bezpečnosti musíme zmínit i jistící a ochranné prvky. Mezi základní komponenty FVE můžeme započítat také akumulátor, který se v dnešních fotovoltaických elektrárnách používá poměrně často. Do FV systému může být zahrnut i systém pro akumulaci přebytečné elektrické energie na ohřev TUV v bojleru nebo v akumulčních nádržích pomocí regulátoru a polovodičového relé.

## 1.1 Fotovoltaické moduly

Fotovoltaické moduly, často označované jako solární moduly, jsou složeny z mnoha fotovoltaických článků, které jsou navzájem propojeny sérioparalelně. To zaručuje požadované výstupní napětí a proud, tedy výkon fotovoltaického modulu. Maximální výkon FV modulu je závislý na velikosti plochy fotovoltaického modulu, tedy na počtu použitých FV článků. Spojením více fotovoltaických modulů vznikne fotovoltaické pole.

Základem fotovoltaického modulu je fotovoltaický článek, který si můžeme představit jako velkoplošnou diodu s PN přechodem. Jednotlivé fotovoltaické články umožňují přeměnu energie elektromagnetického záření na energii elektrickou. Tato přeměna je založena na principu fotovoltaického jevu, který charakterizuje schopnosti určitých materiálů generovat elektrický proud při dopadu slunečního světla. [3]

### 1.1.1 Fotovoltaický jev

Fotovoltaický jev objevil v roce 1839 Edmond Becquerel, ale k jeho širšímu využití došlo až o více než 120 let později kvůli rozvoji polovodičové techniky. Fotovoltaický jev je proces, při kterém jsou elektrony uvolňovány z dané látky v důsledku absorpce elektromagnetického záření. Pro správnou funkci fotovoltaického článku je důležité, aby dopadající foton ze slunečního záření uvolnil v látce elektron a vznikl tak pár elektron-díra. U kovů dojde k okamžité rekombinaci, která není příznivá, jelikož potřebujeme odvést vzniklý náboj z článku ven. Proto se využívají polovodiče, ve kterých jsou elektrony a díry odděleny vnitřním elektrickým polem PN přechodu. [5][6]

Nejpoužívanějším polovodičovým materiálem pro FV články je křemík, který je druhý nejrozšířenější prvek na Zemi a lze získat v čistotě až 99,99998 %. Křemík má 4 valenční elektrony a šířku zakázaného pásu zhruba 1,1 eV. Pro vznik fotovoltaického jevu musí mít dopadající foton energii alespoň 1,12 eV při vlnové délce 1105 nm (infračervené záření), kdy při této energii vznikne v křemíku právě jeden volný elektron a jedna kladná díra. Fotony s kratší vlnovou délkou reprezentující denní světlo mají dostatek energie pro vznik fotovoltaického jevu, jelikož energie těchto fotonů je 1,57 - 3,18 eV. Pokud je ale energie fotonů nedostatečná, k fotovoltaickému jevu vůbec nedojde a veškerá energie se přemění v teplo. To může vzniknout například při zatažené obloze. [4][5]

Pro zvýšení vodivosti křemíku se do něj přidávají příměsi jiných prvků. Přidáním příměsí z III. skupiny periodické tabulky prvků (například bor) získáme polovodič typu P. Tyto příměsi obsahují pouze 3 valenční elektrony, tedy vznikne přebytečná díra. Přidáním příměsí z V. skupiny periodické tabulky prvků (například fosfor) získáme polovodič typu N. Tyto příměsi obsahují pět valenčních elektronů, tedy vznikne přebytečný elektron. Spojením těchto dvou polovodičů vznikne PN přechod, kde dochází k rekombinaci volných elektronů a děr. V oblasti přechodu se vytvoří elektrické pole, které způsobuje pohyb elektronů směrem k pozitivní straně a děr k záporné straně. Kladné částice se tedy pohybují jedním směrem a záporné opačným směrem. Díky tomu je na PN přechodu vytvořena elektrická bariéra. Vlastnost PN přechodu je taková, že volné elektrony mohou přecházet z vrstvy P do vrstvy N, ale nikoliv opačným směrem. Pokud na PN přechod dopadne elektromagnetické záření, fotony předají svou energii atomům v krystalové mřížce, čímž uvolňují elektrony. Uvolněné elektrony se hromadí v horní vrstvě N, protože nemohou přejít přes PN přechod do spodní vrstvy P. Elektrony uvolněné ve vrstvě P mohou přecházet do

vrstvy N. Všechny uvolněné elektrony se tedy hromadí ve vrstvě N, což mezi horní vrstvou N a spodní vrstvou P vytvoří elektrické napětí. [5][6]

Velikost výstupního napětí fotovoltaického článku určuje použitý materiál polovodiče. Při použití křemíku je velikost napětí 0,65 V, které ale při zatížení článku klesá. Výrobci udávají napětí při maximálním využití okolo 0,5 V. Pro připojení FV článku do elektrického obvodu začne obvodem protékat stejnosměrný elektrický proud. Pro požadovaný výkon fotovoltaického modulu se jednotlivé fotovoltaické články spojují sériově (pro vyšší napětí) a paralelně (pro vyšší proud). Většinou jsou FV články ve FV modulu propojeny sérioparalelně, abychom dostali vhodné napětí a vhodný proud na výstupu z FV modulu. [4]

### 1.1.2 Typy fotovoltaických článků

Jak už bylo zmíněno, nejvíce rozšířeny jsou FV články na bázi křemíku. Ten se v přírodě vyskytuje většinou v podobě křemene. Surový křemík se vyrábí z křemenného písku redukcí uhlíkem v obloukové peci, kde dochází k velkému množství chemických reakcí. Z tohoto polotovaru se poté vyrábí ingoty, ze kterých se poté vyrábějí monokrystalické nebo polykrystalické FV články. Dále se můžeme setkat s fotovoltaickými články, které jsou založeny na bázi organických polymerních vrstev nebo se články na bázi arsenidu galia (GaAs). [3]

#### 1.1.2.1 Monokrystalický článek

Monokrystalické články jsou vyrobeny pomocí tzv. Czochralskiho metody, která spočívá v tom, že do taveniny o teplotě přibližně 1415 °C se ponoří malý monokrystal křemíku. Poté se tento krystal pomalu vytahuje pomocí otáčení kolem své osy a vznikne monokrystalický ingot. Ten se dále příčně rozřeže na tenké destičky, tzv. wafery, které tvoří základ FV článků. Fotovoltaický článek se tedy skládá pouze z jediného krystalu křemíku, který má jednotnou a spojitou krystalickou strukturu. Monokrystalické články mají rozpoznatelný tvar křemíkové destičky ve tvaru čtverce se seříznutými rohy. Strukturu a tvar tohoto článku můžeme vidět na obrázku 1.1, kde je porovnán s polykrystalickým a tenkovrstvým článkem. Monokrystalické moduly jsou poté složeny obvykle z 60, 72 nebo ze 120 fotovoltaických článků. [8][9]



Z důvodu homogenity struktury křemíku má tento článek vysokou účinnost, vyšší než u polykrystalického článku. Účinnost se pohybuje mezi 17 a 22 %. To znamená schopnost generovat více energie na jednotku plochy. Často se používají tam, kde je omezený prostor na instalaci fotovoltaických modulů, například u rodinných domů. Nevýhodou je jejich vyšší cena, která se ale kvůli zlepšování výrobní technologie snižuje. [6]

#### *1.1.2.2 Polykrystalický článek*

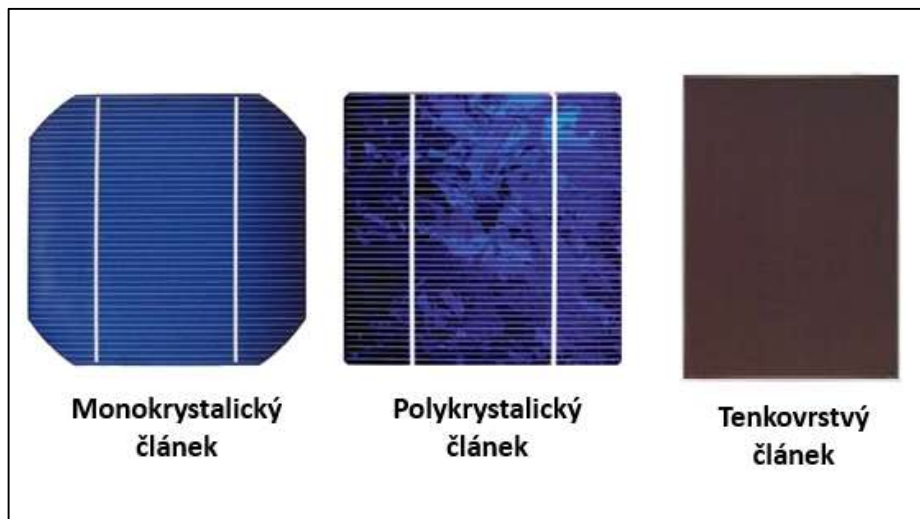
Polykrystalické články se vyrábějí roztavením křemíku a jeho nalitím do formy. Poté dojde k pomalému řízenému ochlazení celé taveniny, čímž dojde k vytvoření velkých monokrystalických zrn. Chceme, aby v materiálu bylo co nejvíce velkých zrn, ale co nejméně dislokací, které tvoří potenciální bariéry pro elektrony. Výsledný polotovar se rozřeže a zpracuje do destiček, které jsou základem fotovoltaických článků. Strukturu tohoto článku můžeme opět vidět na obrázku 1.1, kde je porovnán s monokrystalickým a tenkovrstvým článkem. Obdobně jako u monokrystalických článků se i polykrystalické fotovoltaické moduly skládají z 60, 72 nebo ze 120 fotovoltaických článků. [6]

Důsledkem nehomogenní struktury je nižší účinnost polykrystalických FV článků, která se pohybuje mezi 15 až 17 %. Větší počet krystalů také způsobuje mramorově modré zbarvení článku. Polykrystalické články jsou nepatrně levnější než monokrystalické články. Používají se především pro komerční účely. [10]

#### *1.1.2.3 Tenkovrstvé články*

Tenkovrstvé články jsou vyráběny nanášením tenké vrstvy fotovoltaického materiálu na podkladový materiál, kterým může být například sklo, plast nebo kov. Při použití polymerního podkladu lze vyrábět flexibilní články. Tato tenkovrstvá technologie výroby fotovoltaických článků se snaží snížit spotřebu nákladných polovodičových materiálů. Tento typ článku má velmi tenkou vrstvu aktivního fotovoltaického materiálu v řádech tisícín milimetrů. Existuje několik typů tenkovrstvých článků podle použití aktivního materiálu. Patří mezi ně články s amorfním křemíkem (a-Si články), CdTe články (kadmium-tellurové články), CIGS články (články s mědí, indiem, galiem a selenem) nebo perovskitové články. Na obrázku 1.1 můžeme opět vidět strukturu tohoto FV článku, který je porovnán s monokrystalickým a polykrystalickým článkem. [10]

Oběcně můžeme říct, že tenkovrstvé fotovoltaické články mají nižší účinnost pohybuující se okolo 10 až 13 %. Další nevýhodou je rychlejší degradace materiálu, což způsobuje kratší živostnost těchto fotovoltaických článků. Výhodou je jejich výroba, různý design článku nebo možnost výroby na flexibilních podkladech. Cena záleží na použitém typu materiálu a technologii výroby. [11]



Obrázek 1.1: Porovnání struktury monokrystalického, polykrystalického a tenkovrstvého článku (převzato z [19] a upraveno)

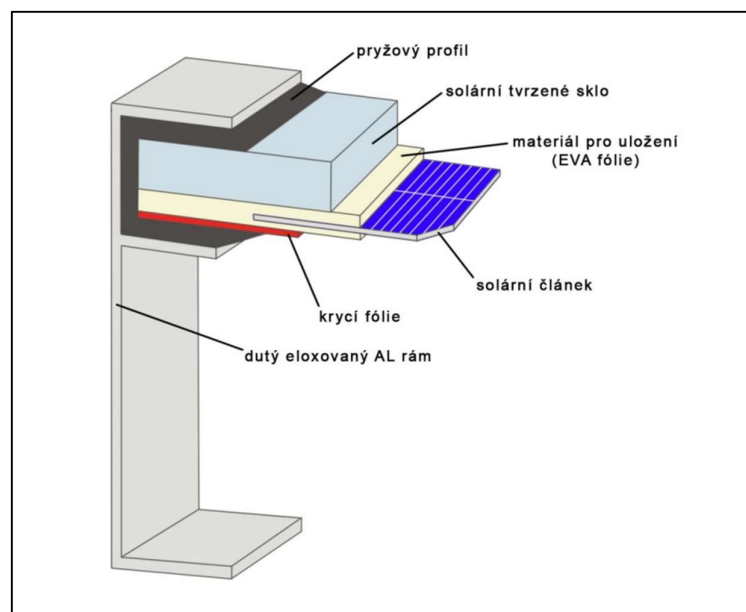
#### 1.1.2.4 Organický článek

Tyto fotovoltaické články využívají organické látky pro přeměnu slunečního záření na elektrickou energii. Jedna z technologií pracuje na principu absorpce barviva podobné tomu, jak rostliny získávají energii ze Slunce fotosyntézou. Tyto články mají potenciál být levnější variantou křemíkové technologie. V současné době mají stále nízkou účinnost, která je okolo 12 %. Jejich výhodou je možnost výroby flexibilních článků nebo nízké náklady na výrobu. Největší problém organických fotovoltaických článků je jejich degradace vlivem slunečního záření nebo vlhkosti, což výrazně ovlivňuje jejich dlouhodobou stabilitu. [6]

### 1.1.3 Konstrukce fotovoltaických modulů

Nejběžnější konstrukce fotovoltaických modulů obsahuje na přední straně temperované (kalené) sklo, které je velmi odolné proti nárazu. Z tohoto důvodu dokážou odolat FV moduly i velkým kroupám. Na tomto skle je položena plastová fólie z etylvinylacetátu, zkráceně EVA fólie. Poté následuje již vrstva s fotovoltaickými články propojenými sérioparalelně, kde kovový pásek spojuje přední kontakt jednoho článku a kontakt na zadní

straně jiného článku. Poté se přes fotovoltaické články opět pokládá EVA fólie. Poslední vrstvu, která je ze zadní strany FV modulu, zajišťuje ve většině případů materiál z laminátové kompozice PVF-PET-PVF (polyvinylidenfluorid-polyethyléntereftalát-polyvinylidenfluorid). Následně je vyčerpán vzduch mezi jednotlivými vrstvami. Poté se FV modul zahřeje nad teplotu tání EVA fólie, ta se vlivem vysoké teploty rozleje a zalije FV články mezi přední skleněnou vrstvou a zadní laminátovou vrstvou. Následně je tento FV modul zarámován do hliníkového rámu a zatmelen silikonovým tmelem pro zatěsnění proti vodě a jiným nečistotám. Na zadní straně FV modulu je umístěná krabice s výstupními kontakty. Znázornění konstrukce FV modulu je zobrazeno na obrázku 1.2 níže. Životnost FV modulu se pohybuje nejběžněji okolo 20 až 40 let. [3][6]



Obrázek 1.2: Konstrukce FV modulu

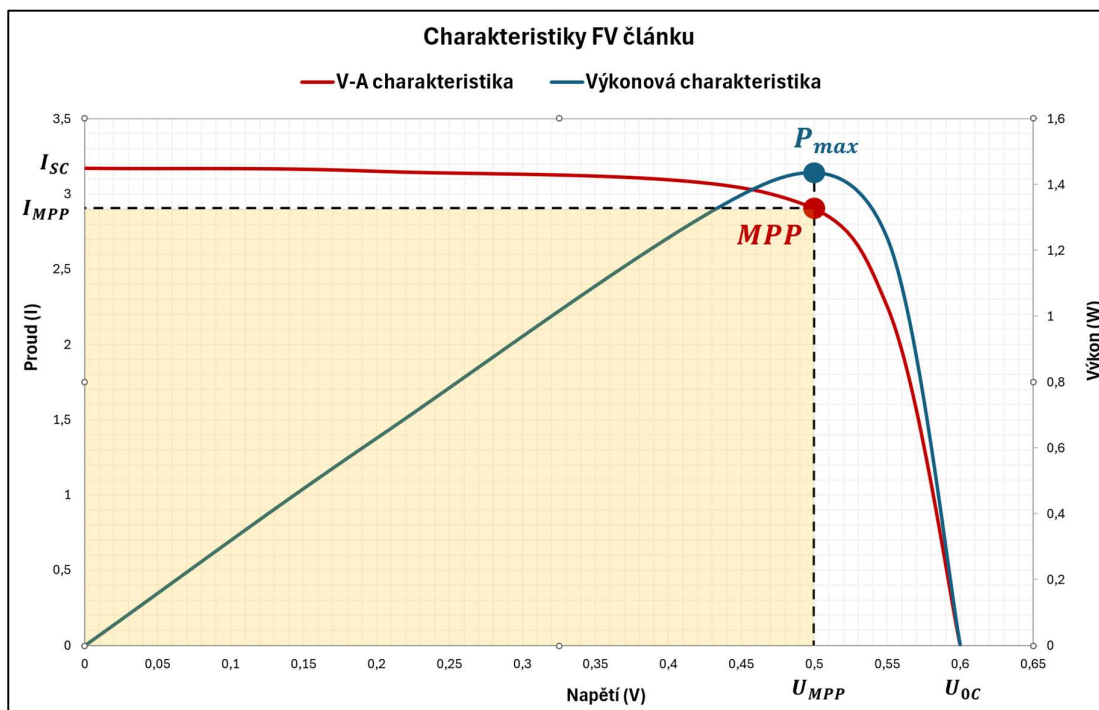
Existují i fotovoltaické moduly, které jsou oboustranné, tedy vyrábějí elektrickou energii z obou stran FV modulu. Nazývají se oboustranné či bifaciální FV moduly. Rozdíl v konstrukci těchto modulů je ten, že na zadní straně je místo klasického laminátu použit průhledný laminát a zadní kontakty nejsou celoplošné. Tento FV modul je optimalizován na dopad světla z přední strany, ale při dopadu světla ze zadní strany FV modulu je účinnost přeměny energie jen o trochu nižší. Oboustranné (bifaciální) FV moduly mají lepší účinnost než klasické FV moduly, ale jsou o něco dražší. [3]

### 1.1.4 Parametry FV modulů

Hlavní elektrické parametry modulů lze získat z jejich voltampérových nebo výkonových charakteristik, mechanické parametry poté uspořádáním a konstrukcí FV modulů. Mezi hlavní parametry můžeme zahrnout:

- proud nakrátko ( $I_{SC}$ ) a napětí naprázdno ( $U_{OC}$ )
- bod maximálního výkonu (MPP)
- napětí při maximálním výkonu  $U_{MPP}$  a proud při maximálním výkonu  $I_{MPP}$
- účinnost FV modulu
- činitel plnění (FF)

Všechny tyto parametry a spousta dalších parametrů FV modulu vychází z voltampérové charakteristiky FV článku. Voltampérová charakteristika udává základní informace o činnosti fotovoltaických článků a jedná se o jednu z nejdůležitějších vlastností. Voltampérová charakteristika společně s výkonovou charakteristikou monokrystalického FV článku jsou znázorněny na obrázku 1.3, kde jsou vyznačeny všechny důležité body. Průsečík křivky voltampérové charakteristiky se svislou osou udává proud nakrátko ( $I_{SC}$ ) a průsečík s vodorovnou osou udává napětí na prázdko ( $U_{OC}$ ).



Obrázek 1.3: V-A charakteristika a výkonová charakteristika FV článku

Proud nakrátko  $I_{SC}$ , či zkratový proud, představuje proud, který protéká FV článkem při spojení výstupních svorek nakrátko. Jde tedy o maximální hodnotu proudu, který může FV článek dodávat při dané intenzitě slunečního záření. Tato hodnota je závislá na intenzitě osvětlení a na teplotě a pohybuje se od desítek mA až po jednotky A. [13]

Napětí naprázdno  $U_{OC}$  udává napětí FV článku, které je možno dosáhnout při rozpojeném obvodu. Jedná se o maximální hodnotu napětí FV článku, které se na něm může objevit při dané teplotě a intenzitě osvětlení, tedy velikost napětí je závislá na těchto parametrech. Hodnota  $U_{OC}$  se pohybuje okolo 0,6 V u monokrystalických článků. [13]

Největší výkon FV článku se nachází v bodě, kde je součin napětí a proudu největší. Tento bod je označován jako bod maximálního výkonu (MPP) o velikosti napětí  $U_{MPP}$  a o velikosti proudu  $I_{MPP}$ . Tento bod udává maximální elektrický výkon FV článku. Na výkonové charakteristice je maximální výkon označen bodem  $P_{max}$  a jeho velikost se udává ve wattech špičkového výkonu, označované jako Wp (wattpeak). Maximální výkon FV článku vypočteme z následující rovnice:

$$P_{max} = U_{MPP} \cdot I_{MPP}, \quad (1.1)$$

kde  $U_{MPP}$  je napětí pro bod maximálního výkonu a  $I_{MPP}$  je proud pro bod maximálního výkonu. [13]

Výkon FV článků či modulů je udáván za standartních testovacích podmínek označované jako STC (Standart Test Conditions). Tyto podmínky jsou definovány teplotou článků  $t = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ , intenzitou slunečního záření  $E = 1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  a spektrem  $AM^1 = 1,5$ . Někdy se můžeme ještě setkat s podmínkami NOCT (Nominal Operating Cell Temperature), které udávají podmínky více odpovídající provozním podmínkám FV modulu. Podmínky NOCT jsou definovány intenzitou slunečního záření  $E = 800 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , teplotou okolního vzduchu  $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ , rychlostí větru  $v = 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , volným přístupem vzduchu k zadní straně FV modulu a spektrem  $AM = 1,5$ . Teplota FV modulu může dosahovat vyšších hodnot a je tak

---

<sup>1</sup> AM = Air Mass. AM je koeficient hmoty vzduchu, kterou musí sluneční záření projít, než dosáhne zemského povrchu. Koeficient AM je roven jedné, pokud je Slunce situováno kolmo k povrchu Země a sluneční záření tedy putuje skrz atmosféru nejkratší možnou dráhou. Není-li Slunce přímo nad obzorem, dráha se prodlužuje a koeficient AM je větší než 1. Pro srovnávání a testování jednotlivých FV modulů je definován tento koeficient hodnotou AM = 1,5.

přiblížena teplotě FV modulů v reálných podmínkách. Všechny elektrické vlastnosti FV článků či modulů jsou vždy vyhodnocovány za podmínek STC a většinou i za podmínek NOCT. [14]

Dalším důležitým parametrem je účinnost FV článku. Jedná se o účinnost přeměny sluneční energie dopadající na FV článek na energii elektrickou. Pro výpočet účinnosti přeměny sluneční energie na elektrickou můžeme napsat rovnici:

$$\eta = \frac{U_{MPP} \cdot I_{MPP}}{P_{IN}} = \frac{P_{MPP}}{P_{IN}}, \quad (1.2)$$

kde  $U_{MPP}$  je napětí pro bod maximálního výkonu,  $I_{MPP}$  je proud pro bod maximálního výkonu a  $P_{IN}$  je výkon dopadajícího slunečního záření. Účinnost FV článku je dána především vlastnostmi použitého materiálu, ze kterého je fotovoltaický článek vyroben. Pokud bude FV článek pracovat v blízkosti bodu maximálního výkonu, tak je zajištěná i maximální účinnost FV článku. Skutečný výkon FV článku i jeho účinnost závisí na velikosti ozáření článku, na úhlu dopadu slunečních paprsků, ale především na teplotě FV článku. Se zvyšující se teplotou FV článku dochází ke změně elektrických vlastností, které vedou ke snížení napětí naprázdno ( $U_{OC}$ ). To způsobí snížení výkonu i účinnosti FV článku. Obdobně se snižujícím se ozářením FV článku se snižuje jeho výkon i jeho účinnost. [13]

Činitel plnění označený jako FF (Fill Factor) udává elektrickou účinnost FV modulu a je dán především konstrukcí modulu. Tento činitel udává poměr mezi maximálním výkonem  $P_{max}$  a výkonem daným zkratovým proudem  $I_{SC}$  a napětím naprázdno  $U_{OC}$ . Plocha maximálního výkonu je na obrázku 1.3 vylučena. Hodnota činitele plnění se pohybuje přibližně 0,7 až 0,85 u monokrystalických i polykrystalických článků a lze vyjádřit vztahem:

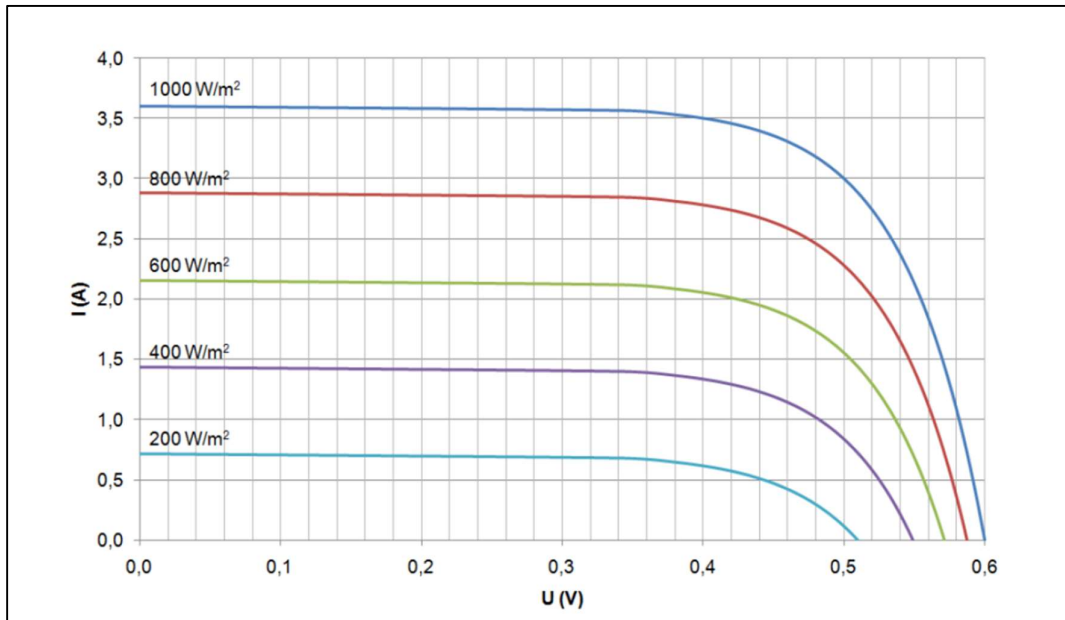
$$FF = \frac{U_{MPP} \cdot I_{MPP}}{U_{OC} \cdot I_{SC}}, \quad (1.3)$$

kde  $U_{MPP}$  je napětí pro bod maximálního výkonu,  $I_{MPP}$  je proud pro bod maximálního výkonu,  $U_{OC}$  je napětí naprázdno a  $I_{SC}$  je proud nakrátko. [13]

### 1.1.5 Vliv klimatických parametrů na výkon FV článku

Velmi významný dopad na výkon fotovoltaického článku má dopadající světelné záření a teplota článku. Výkon FV článku je změřen za standardních testovacích podmínkách (STC), ale reálné podmínky jsou většinou odlišné. Výrazněji ovlivňuje výkon intenzita

dopadajícího záření, která především snižuje velikost generovaného proudu, na velikost napětí nemá výrazný vliv. Pokud dojde ke snížení hodnoty intenzity slunečního záření na polovinu, tak dojde i ke snížení generovaného proudu přibližně na polovinu a tím dojde k poklesu celkového výkonu FV článku zhruba na polovinu. Z toho vyplývá, že se i výrazně změní průběh V-A charakteristiky FV článku. Tato závislost je znázorněna na obrázku 1.4.

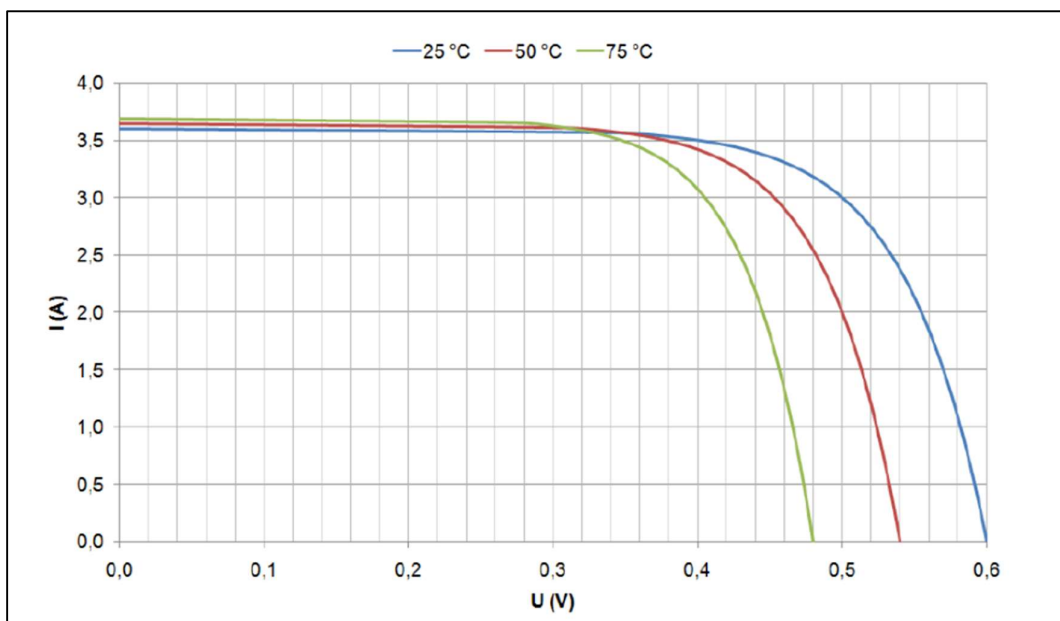


Obrázek 1.4: V-A charakteristika FV článku v závislosti na intenzitě osvětlení

Snížení intenzity slunečního záření může nastat i zastíněním FV modulu okolními objekty, jako například okolními budovami, stromy apod. Zastínění jen malé plochy FV modulu má velký dopad na snížení výkonu celé řady sériově propojených FV článků uvnitř modulu, ale i na všechny sériově propojené FV moduly. Proto se při instalaci FV modulů snažíme stínům co nejvíce vyvarovat. Existují ale i řešení, které tento vliv omezují. Při zastínění pouze jednoho FV článku v celém modulu dojde ke snížení generovaného proudu tímto článkem. Celý FV modul poté dodává jen takový proud, který je generován tímto nejhorším článkem a dojde tedy k výraznému snížení výkonu celého FV modulu. Tento jev má za následek další negativní vliv, kterým je nadměrné zahřívání zastíněného FV článku, protože ostatní články dodávají přebytečnou energii do tohoto jednoho FV článku, kde se tato energie přeměňuje na teplo. Proto se FV modul rozděluje na sekce pomocí tzv. bypass diod. Ty jsou dnes osazovány na každý fotovoltaický modul do jeho přípojovací krabice, obvykle v počtu třech kusů a rozdělují tak FV modul na jednotlivé sekce sériově propojených FV článků. Bypass diody odvádí elektrický proud mimo zastíněný článek. Při zastínění jednoho článku tak

výkon celého FV modulu neklesne tak významně, jako bez těchto diod. Dalším řešením jsou tzv. optimizéry. Optimizéry jsou většinou osazeny samostatně na každý FV modul, který poté vyrábí maximální množství energie bez ohledu na ostatní FV moduly ve stringu<sup>2</sup>. Pomocí optimizéru dochází k hledání co neoptimálnějšího bodu výkonu jednoho FV modulu, nikoliv celé sekce FV modulů jako u MPPT, který je součástí střídače. [15]

Dalším výrazným ovlivňujícím faktorem je teplota, která má vliv především na napětí FV článků, ale naopak výrazně neovlivňuje generovaný proud. S rostoucí teplotou dochází ke snížení výstupního napětí FV článku, tedy i ke snížení jeho výkonu a účinnosti. Při změně teploty o 1 °C dojde ke zmenšení napětí monokrystalických článků přibližně o 0,45 %. To znamená, že při navýšení teploty o 30 °C (na FV článku naměříme teplotu 55 °C) dojde ke snížení výkonu přibližně o 13,5 %. K tomu dochází v letním období, kdy může teplota FV modulů stoupnout až nad 60 °C. Naopak v zimních měsících vlivem nízké teploty (-5 °C) může napětí FV modulu vzrůst až na hodnotu 113,5 % jmenovitého napětí. Proto paradoxně mají FV moduly větší účinnost v zimním období než v letním. Závislost V-A charakteristiky FV článku na teplotě je zobrazena na obrázku 1.5. Proč tedy generují FV moduly nejvíce energie v létě? Protože v letním období je výrazně vyšší intenzita záření a delší doba slunečního svitu.



Obrázek 1.5: V-A charakteristika FV článku v závislosti na teplotě

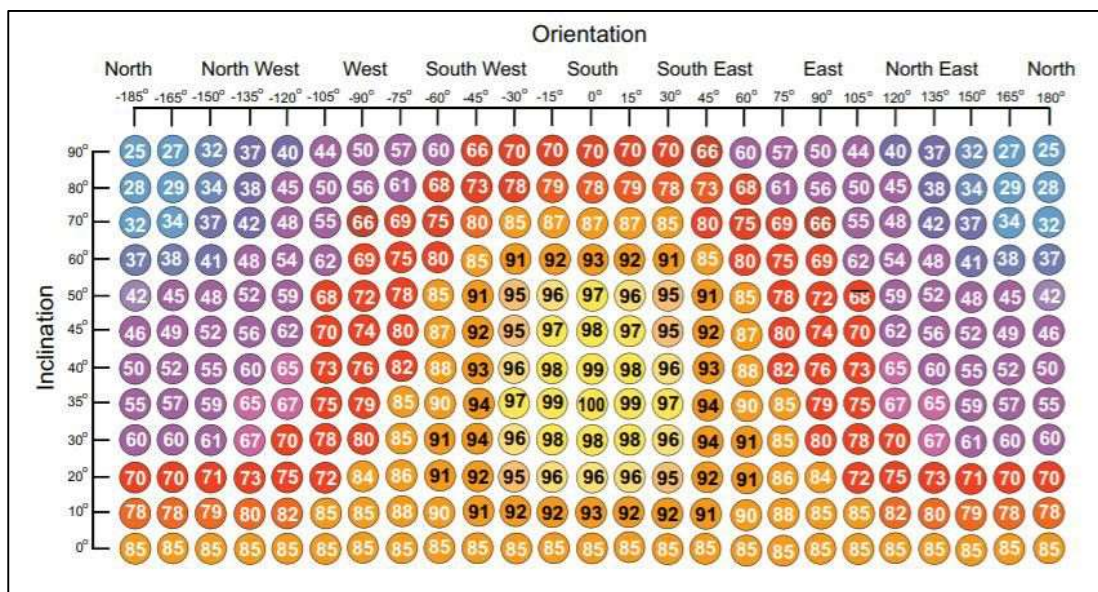
<sup>2</sup> String označuje řetězec sériově propojených FV modulů (více viz.[14]).



### 1.1.6 Optimální sklon a orientace FV modulů

Dopadající sluneční energie na plochu FV modulu za určitý časový úsek je závislá na sklonu a orientaci FV modulu. Neoptimálnější orientací je z hlediska roční dopadající energie jih. Při odklonění FV modulů o  $\pm 45^\circ$  od jihu směrem na východ nebo západ při ideálním sklonu dojde ke snížení roční dopadající energie maximálně o 10 %. Při přímé východní či západní orientaci je změna už o více než 20 %. To ale platí pouze pro nezastíněné FV moduly, tedy v případě, kdy se v okolí nevyskytují další objekty. [16][17]

Ideální sklon FV modulů pro Českou republiku vzhledem k roční dopadající energii je okolo  $35^\circ$ . Při změně sklonu FV modulu o  $\pm 15^\circ$  klesne roční dopadající energie pouze o 4 %. Tedy na celkový výnos energie má sklon nižší dopad než orientace FV modulů. Nižší sklon je výhodnější pro letní využití dopadající sluneční energie, ale v zimě je tato energie výrazně nižší. Naopak vyšší sklon je výhodnější pro zimní dopadající sluneční energie. Procentní výnos energie v závislosti na sklonu a orientaci FV modulu je zobrazena na obrázku 1.6, kde je vidět ideální orientace a ideální sklon FV modulů. [16][18]



Obrázek 1.6: Procentní výnos energie v závislosti na orientaci a sklonu FV modulu (převzato z [16])

## 1.2 Fotovoltaický střídač

Fotovoltaický střídač, často označovaný jako invertor, je klíčovým zařízením fotovoltaické elektrárny. Střídač zajišťuje přeměnu stejnosměrné energie vyrobené fotovoltaickými moduly na střídavou elektrickou energii, která je běžně použita pro napájení většiny spotřebičů a zařízení. Zároveň střídač umožňuje připojení fotovoltaické elektrárny do distribuční sítě kvůli transformaci na napětí 230/400 V, 50 Hz. Synchronizace a sfázování s distribuční sítí probíhá automaticky. To platí pro síťové invertory. U ostrovního invertoru se napětí a frekvence generuje samotným měničem, většinou také na 230/400 V, 50 Hz kvůli možnosti připojení běžných spotřebičů. Pro některé aplikace může být výstupní napětí a frekvence odlišná. Z hlediska zapojení střídačů ve fotovoltaickém systému je můžeme rozdělit na:

- modulové střídače
- řetězové nebo stringové střídače
- centrální střídače

Modulový střídač je připojen ke každému FV modulu a je často umístěn v kontaktní krabici FV modulu. S těmito střídači se setkáme velmi zřídka. Řetězové střídače jsou připojeny k sérii FV modulů, tento řetězec FV modulů se označuje pojmem string. Obvykle mívají tyto střídače 2 až 3 vstupy pro připojení jednotlivých stringů s fotovoltaickými moduly. S těmito střídači setkáme běžně u malých a středně velkých elektráren. Pro velké fotovoltaické elektrárny jsou používány střídače centrální. Na tyto jsou připojeny stovky až tisíce fotovoltaických modulů, které jsou spojeny do velkého množství stringů. [12]

Střídače se vyrábějí v určitých výkonových řadách a provedeních. Střídače můžeme rozdělit na střídače napětí a střídače proudu, poté na střídače jednofázové a třífázové nebo na střídače symetrické a asymetrické. Symetrické střídače umí dodat do všech fází stejný výkon, například do všech fází výkon 2 kW. Vzhledem k tomu, že běžně na všech třech fázích není vždy stejný odebraný výkon, je určitě lepší využít asymetrického střídače. Ten dokáže rozdělit výkon do jednotlivých fází zvlášť podle potřeby, například do jedné fáze výkon 1,8 kW, do druhé 2 kW a do třetí 2,2 kW. Dnešní používané střídače umějí i přetížít jednu z fází, například na 150 % po omezenou dobu. To zlepšuje efektivitu využití elektrické energie z fotovoltaické elektrárny.

Dnes téměř každý střídač obsahuje jeden nebo více MPPT (Maximal Power Point Tracker). Jde o zařízení, které sleduje bod maximálního výkonu (MPP) a změnou vstupního odporu zajišťuje optimalizaci výstupního napětí a proudu tak, aby byl celkový výkon co nejvyšší. Tedy zajišťuje, aby FV modul pracoval neustále v blízkosti pracovního bodu maximálního výkonu. Prakticky se jedná o spínaný zdroj řízený mikrokontrolerem. Pomocí MPPT rozstřídáme napětí a proud z fotovoltaických modulů, poté jej transformujeme a nakonec usměrníme. Díky tomu může být napětí a proud na FV modulech rozdílný než napětí a proud na výstupu z regulátoru. [18]

### 1.2.1 Vlastnosti střídače

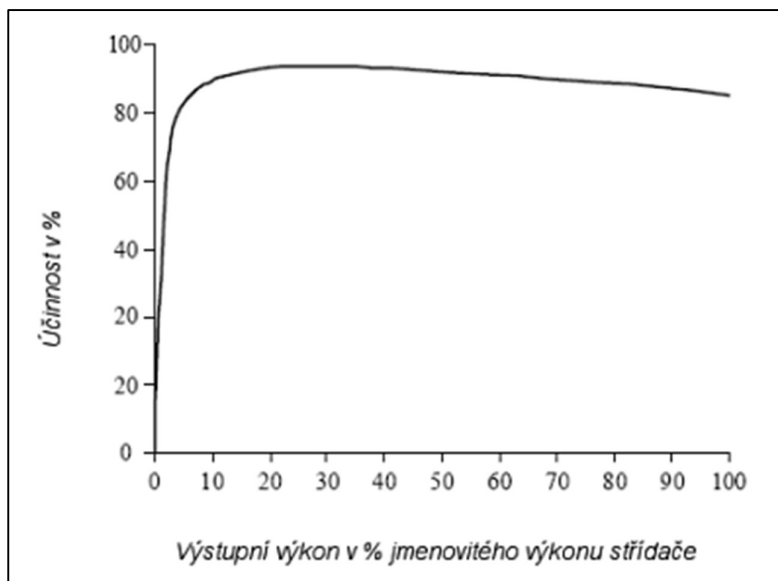
Z vlastností střídače nás zajímají především ty elektrické. Mezi hlavní elektrické vlastnosti střídače řadíme:

- maximální DC výkon
- nominální AC výkon
- rozsah vstupního napětí a proudu (pro MPPT)
- účinnost střídače, účinnost MPPT a euro účinnost
- vlastní spotřeba střídače

Maximální DC výkon udává maximální stejnosměrný výkon FV pole složeného z jednotlivých FV modulů, který lze na střídač připojit. Většinou bývá tento výkon větší než nominální AC výkon střídače. Nominální AC výkon střídače udává maximální střídavý výkon, který je schopen střídač dodat do elektrické sítě. Tento výkon se volí podle počtu FV modulů a jejich celkového výkonu, aby nebyl střídač zbytečně předimenzovaný a drahý. Rozsah vstupního napětí a proudu určuje minimální a maximální hodnoty napětí a proudu, které lze na střídač připojit, respektive na jednotlivé MPPT uvnitř střídače. Minimální hodnota napětí udává startovací napětí, při kterém začíná střídač pracovat. Při správném návrhu musí být schopna série FV modulů dosáhnout tohoto napětí za každé teploty, protože se napětí FV modulů mění v závislosti na teplotě (více viz. kapitola 1.1.5). Mohlo by dojít k tomu, že by v létě daná série FV modulů nenastartovala střídač a FVE by vůbec nefungovala. Maximální hodnota napětí a proudu je dána vnitřním uspořádáním a nesmí se překročit, jinak hrozí zničení střídače.

Velmi důležitá je také účinnost střídače. Obvykle se udává maximální účinnost střídače, účinnost MPPT a euro účinnost. Maximální účinnost střídače udává účinnost střídače za optimálních podmínek, tato účinnost se pohybuje okolo 90 až 98 %. Více vypovídající vzhledem k reálnému použití je tzv. euro účinnost, která je průměrem účinnosti při různých stupních zatížení střídače (5, 10, 20, 30, 50 a 100 % nominálního výkonu). Hodnota euro účinnosti je tedy o několik % nižší než u předešlé maximální účinnosti střídače. Poslední udávanou účinností je účinnost MPPT, která udává, jak rychle se dokáže MPPT adaptovat na změnu klimatických podmínek, tedy na změnu bodu maximální výkonu FV modulu. Hodnota této účinnosti většinou neklesá pod 99 %. Na obrázku 1.7 je zobrazena křivka účinnosti střídače. [20]

Vlastní spotřeba střídače udržuje střídač v chodu, i když FV moduly nevyrobí elektrickou energii. Jedná se o tzv. pohotovostní režim. Tato spotřeba nejčastěji bývá v řádu jednotek až desítek wattů. [20]



Obrázek 1.7: Závislost účinnosti střídače na výstupním výkonu (převzato z [20])

### 1.3 Akumulátory

S rostoucím rozvojem fotovoltaických elektráren dochází i k rozvoji akumulátorů (označovány také jako baterie), které se čím dál častěji objevují u FV systémů. Jedním z úskalí fotovoltaické elektrárny je závislost výroby elektrické energie na slunečním záření, tedy výroba elektrické energie pouze přes den. To vyhovuje například instalacím na firemních podnicích, ale pro rodinné domy je tato závislost méně vhodná. Proto se pro tyto účely vkládají do fotovoltaického systému akumulátory, které zajistí uložení elektrické energie pro pozdější použití, když je slunečního svitu nedostatek. Akumulátory ve fotovoltaickém systému mají i další využití, jako například napájení spotřebičů při výpadku sítě. Dříve se používaly olovené akumulátory, ale dnes se používají výhradně akumulátory lithiové. Společně s nimi se do fotovoltaického systému také instalují regulátory dobíjení, které mají za úkol regulovat velikost napětí a proudu při nabíjení či vybíjení baterie společně s teplotou baterie. Tyto regulátory jsou dnes většinou součástí střídače.

#### 1.3.1 Olovené akumulátory

Olovený akumulátor, vynalezený francouzským fyzikem Gastonem Plantém v roce 1859, je nejstarší technologií dnešních používaných akumulátorů. I přes to je dnes běžně využíván jako startovací baterie v automobilech, jako trakční baterie nebo jako záložní zdroje pro různé aplikace. Důvodem použití je nízká cena, vysoká spolehlivost a dobrá recyklovatelnost akumulátoru. [6][18]

Olovený akumulátor je složen z několika párů slitiny olovených desek (mřížek), které tvoří elektrody. Ty jsou ponořeny do nádoby obsahující roztok kyseliny sírové. Samotné olovo je velmi měkké, proto se do něj přidávají příměsi jiných kovů pro zlepšení mechanické pevnosti. Při vybíjení klesá koncentrace kyseliny sírové kvůli vzniku vody, při nabíjení naopak koncentrace stoupá. [12]

Samostatný olovený článek (dvojce desek) má napětí naprázdno 2 V. Jednotlivé články jsou poté v akumulátory spojeny, aby byly schopné dodávat nominální napětí o hodnotách 6 V, 12 V, 24 V nebo 48 V. Nejrozšířenějšími jsou olovené akumulátory s napětím 12 V. Výhodou oloveného akumulátoru je schopnost vybíjení vysokým proudem nebo dobré vlastnosti při nízkých i vysokých teplotách. Naopak nevýhodou je jejich hmotnost vzhledem

k hustotě energie a jejich nízká životnost, která je závislá na hloubce vybití označované DoD (Depth of Discharge). Tato závislost je uvedena v tabulce 1.1. [21]

Tabulka 1.1: Závislost počtu cyklů na úrovni vybití oloveného akumulátoru (převzato z [21])

Úroveň vybití	Startovací baterie	Trakční baterie
100 %	12–15 cyklů	150–200 cyklů
50 %	100–120 cyklů	400–500 cyklů
30 %	130–150 cyklů	1 000 a více cyklů

### 1.3.2 Lithium-iontové akumulátory

Lithium-iontové, zkráceně Li-ion baterie jsou dnes nejpoužívanějšími bateriemi pro uložení elektrické energie. Hlavní látkou je lithium, které se využívá jako elektrolyt ve formě soli. Jako anoda se poté používá aktivní materiál, který udává i název dané baterie. Například lithium-kobaltová ( $LiCoO_2$ ) baterie má označení podle kobaltu jakožto aktivního materiálu v tomto typu baterie. Pro účely v oblasti energetiky, tedy i pro fotovoltaické elektrárny, se používá zejména lithium-železo-fosfátový akumulátor, často označovaný zkratkou  $LiFePO_4$  nebo LFP. Klíčovými výhodami této baterie jsou především dlouhá životnost, dobrá tepelná stabilita nebo vyšší bezpečnost. [22]

Lithium-železo-fosfátový akumulátor má kladnou elektrodu tvořenou sloučeninami lithia, železa a fosforu ( $LiFePO_4$ ), záporná elektroda je tvořena uhlíkovým materiálem (grafitem). Elektrolytem je lithiová sůl. Při nabíjení přechází ionty lithia z kladné elektrody přes elektrolyt na zápornou elektrodu, při vybíjení je tento děj opačný. Mezi elektrody je vložena tenká keramická fólie sloužící pro oddělení elektrod a zabraňující zkratu mezi elektrodami. Napětí jednoho článku je 3 až 3,3 V, nabíjení článku je při 3,6 V. Z toho plyne jejich dlouhá životnost, jelikož sedimentace elektrolytu na anodě a oxidace na katodě probíhá nejvíce při napětí článku nad 3,9 V a při teplotách nad 50 °C. Tedy napětí a teplota baterie se při provozu těmito hodnotám ani nepřiblíží. [22]

Velká výhoda LFP akumulátorů proti oloveným je v nabíjení a ve vybíjení. Olovené baterie nemají obecně rády rychlé nabíjení či vybíjení, to snesou pouze startovací baterie, ale pouze po omezenou dobu. LFP akumulátory lze nabíjet i vybíjet velmi rychle, tedy vysokým výkonem, a navíc ještě po dlouhou dobu. Limitem je jejich deklarovaná kapacita. Nevýhodou LFP akumulátorů je jejich nízká hustota energie vztážená na 1 kg, která je

mezi 80 a 120 Wh/kg. LFP baterie je i zhruba 3x dražší než olověná baterie. Všeobecně jsou tedy olověné baterie více vyhovující pro nenáročné použití a LFP baterie jsou lépe použitelné pro náročnější aplikace včetně fotovoltaických elektráren. [23]

Součástí LFP akumulátoru u fotovoltaického systému je i tzv. BMS (Battery Management System), což je vlastně řídicí modul baterie. Tento modul je i havarijní pojistka proti poškození baterie, které může být způsobeno úplným vybitím nebo naopak přebitím baterie. Tento modul slouží i k vybalancování jednotlivých článků v baterii, které zajišťuje, že mají všechny články stejné napětí. Ukončení nabíjení nebo vybíjení baterie není řízeno BMS, ale pomocí regulátoru dobíjení. [23]

### 1.3.3 Regulátory dobíjení

Součástí střídače, zejména hybridního, je regulátor dobíjení. Tento regulátor se používá k řízení vybíjení či nabíjení akumulátoru z fotovoltaických modulů. Zároveň hlídá teplotu baterie, podle které upravuje hodnoty napětí a proudu. Jeho hlavním úkolem je udržet optimální napěťové a proudové podmínky, aby byla zajištěna co nejdelší životnost akumulátoru. Existují dva typy regulátorů, první z nich je PWM regulátor, který je levnější a jednodušší. Druhým z nich je MPPT regulátor, který je dražší a sofistikovanější. Více podrobností o MPPT je sepsáno v kapitole 1.1.6 zaměřenou na střídače. Dále můžeme rozdělit zapojení baterií a fotovoltaického měniče na dva způsoby označované jako DC Coupling a AC Coupling.

#### 1.3.3.1 DC Coupling

DC Coupling označuje nabíjení akumulátorů přímo z FV pole, tuto metodu využívají především hybridní měniče. Baterie je tedy umístěna na DC straně FV systému. K nabíjení baterie se používají malé solární regulátory nebo větší a účinnější regulátory s MPPT. Dnes jsou již tyto regulátory nabíjení či vybíjení integrovány do těla střídačů. Výhodou této metody je vysoká účinnost nabíjení, která je až 99 % při použití MPPT. Nevýhodou je naopak nižší účinnost při napájení velkých střídavých spotřebičů vlivem ztrát kvůli převodu stejnosměrné energie na střídavou. [24]

### 1.3.3.2 AC Coupling

AC Coupling je systém, kde je baterie umístěná na AC straně FV systému. Tedy stejnosměrná energie z FV modulů je nejdříve střídačem přeměněna na střídavou a poté teprve dochází k nabíjení baterie. Nabíjení baterie se provádí pomocí multifunkčních střídačů, které jsou jednoduché a výkonné. Nevýhodou je nižší účinnost při nabíjení baterie z FV modulů, která se pohybuje okolo 90 až 94 %. Naopak výhodou je vysoká účinnost při napájení střídavých zátěží přímo z baterie. [24]

## 1.4 Kabely a elektroinstalační materiál

Důležitou součástí každé fotovoltaické elektrárny jsou kabely, jak pro stejnosměrný proud (DC), tak i pro střídavý proud (AC). S tím souvisí i elektroinstalační materiál, především jističí a ochranné prvky, které zajišťují bezpečnost celého FV systému.

Pro transport vyrobené stejnosměrné elektrické energie z fotovoltaických modulů ke střídači se využívají DC solární kabely. Pro každý string je vyžadován pár těchto jednožilových kabelů, tedy jeden lankový vodič s červenou barvou izolace a druhý s černou barvou izolace. Dle příslušné normy ČSN se používají jednožilové kabely s označením H1Z2Z2-K. Tyto kabely lze použít do hodnoty 1500 V stejnosměrného napětí, mají dvojitý plášť z polyuretanu a skvělou tepelnou odolnost, takže odolají oděru, UV záření, povětrnostním vlivům, ale i šíření planeme. Kabely se vyrábí o různých průřezech vodiče, nejčastějším používaným průřezem je průřez o velikosti 6 mm<sup>2</sup>. Na konci těchto solárních kabelů jsou umístěny speciální konektory pro propojení fotovoltaických modulů se střídačem. Můžeme se setkat s různými typy konektorů, ale nejběžněji se používají solární konektory s označením MC4. [25]

Pro propojení střídače s místem spotřeby, kterým může být například hlavní domovní rozvaděč (HDR), se používají klasické silové kabely o vhodném průřezu dle výkonu střídače a délce kabelového spoje. Například pro fotovoltaickou elektrárnu se střídačem o výstupním výkonu 10 kW a pro krátkou vzdálenost kabelové trasy mezi střídačem a rozvaděčem (např. 15 metrů) lze použít silové kabely CYKY-J 5x10. Pro delší vzdálenost nebo silnější střídač lze použít silové kabely CYKY-J 5x10, naopak pro slabší střídač a krátké trasy lze použít i menší průřez silového kabelu.



Pro zajištění elektrické bezpečnosti fotovoltaické elektrárny obsahují tyto systémy jističů a ochranné prvky. Ochranné prvky FVE můžeme rozdělit na prvky pro stejnosměrné napětí a prvky pro střídavé napětí. Mezi ochranné prvky pro stejnosměrné napětí zařazujeme jističe a pojistkové odpojovače, přepět'ové ochrany a vypínače FVE. Do ochranných prvků pro střídavé napětí patří jističe a přepět'ové ochrany.

Základní ochrana DC řetězce je realizována pomocí DC pojistkovým odpojovačem, který chrání FV moduly před poruchovými proudy. To samé využití mají DC jističe, které mají oproti pojistkovému odpojovači tu výhodu, že jsou po vypnutí ihned připraveny k opětovnému zapnutí (pokud byla porucha odstraněna), přičemž pojistky se musí vyměnit za nové. Dále se pro ochranu FV systému používají DC přepět'ové ochrany. Přepět'ové ochrany chrání před přechodovým napětím, které může být způsobeno například nepřímým bleskovým výbojem. Posledním ochranným prvkem je tzv. vypínač FVE. Jde o odpojení FVE na DC straně při požáru budovy. Tato ochrana spočívá v rozdělení daného stringu (řetězce) FV modulů na sekce a tím pádem se rozdělí i napětí pouze na rozdělenou část. Například napětí o hodnotě 1000 V, které je na celém stringu, bude rozděleno na 50 V na 20 sekcí. To usnadňuje hašení a snižuje nebezpečí úrazu elektrickým proudem. Instalace této ochrany je povinná dle příslušné normy do FV systémů, které mají jmenovitý výkon vyšší než 10 kWp. Pod tuto hodnotu výkonu není instalace vypínače FVE povinností. [26]

### **1.5 Regulátor pro akumulaci přebytečné energie**

Tyto regulátory, jsou určeny pro zlepšení využití elektrické energie z fotovoltaické elektrárny v daném objektu v čase, kdy FVE vyrábí nejvíce energie. To je výhodné i z ekonomického hlediska, jelikož se vyrobená energie z fotovoltaické elektrárny spotřebovává přímo v místě výroby a není dodávána do distribuční sítě. To může mít podíl na větší stabilitu distribuční sítě nebo na omezení negativních vlivů FVE v distribuční síti. Mezi nejhlavnější výrobce těchto regulátorů patří WATTrouter, GreenBonO nebo NORD. K těmto regulátorům se nejčastěji připojují bojlerů nebo akumulací nádrže s topnými tělesy na ohřev TUV. To znamená, že se tyto nádrže nahřívají během dne z přebytků elektrické energie z fotovoltaické elektrárny a nemusejí se nahřívát v době určeným signálem HDO (hromadné dálkové ovládání). Signál HDO je většinou spínán ve večerních hodinách, když už FVE nevyrobí elektrickou energii. Většina těchto regulátorů mají vstup i pro tento signál, takže pokud nedojde k nahřátí nádrže přes den z fotovoltaické elektrárny pomocí přebytků

energie, dojde k nahřátí nádrže z nízkého tarifu z distribuční sítě podle spínacích hodin určených distributorem. [27]

Regulátory pro akumulaci přebytečné energie mají měřicí modul, který je schopen měřit proud ve všech fázích v reálném čase. Tento modul musí být instalovaný tzv. na patě domu, což znamená instalaci modulu hned za elektroměr. Samotný regulátor poté vyhodnocuje naměřené proudy a podle toho spíná připojené spotřebiče. Regulátor může mít více výstupů a každý výstup může mít jinou prioritu. Regulátor se snaží udržet nulový tok energie měřicím modulem, aby všechna přebytečná energie z FVE byla spotřebována na připojených zátěžích. Pro spínání jednotlivých zátěží za regulátorem slouží polovodičové relé označované SSR (Solid State Relay), což je elektronické spínací relé, které neobsahuje žádné mechanické části. Výhodou je rychlá odezva a široký rozsah proudů a napětí. Tyto relé se sepnou dle nastavené priority pomocí regulátoru a poté dochází k plynulému řízení výkonu dané zátěže. Pokud dojde ke snížení výkonu FVE nebo dojde ke zvýšení spotřeby objektu, regulátor odpojí jednotlivé výstupy dle nastavených priorit. Pokud dojde k ohřátí nádrže na nastavenou teplotu termostatem, dojde opět k vypnutí daného výstupu. [27]

## 2 Typy fotovoltaických systémů

Fotovoltaické elektrárny můžeme rozdělit podle několika hledisek, například podle instalovaného výkonu nebo podle napojení do distribuční sítě. Podle instalovaného výkonu můžeme FVE rozdělit na mikroinstalace s výkonem do 10 kWp, malé fotovoltaické elektrárny s výkonem 10 až 100 kWp, střední fotovoltaické elektrárny s výkonem 100 až 1000 kWp a na velké FVE s výkonem nad 1 MWp. Častěji se setkáme s rozdělením fotovoltaických systémů podle způsobu napojení do distribuční sítě na ostrovní systémy nebo na síťové systémy. Ostrovní systém je též nazýván jako tzv. off-grid systém, který není spojen s distribuční sítí. Naopak síťové systémy jsou napojeny do distribuční sítě a dále se rozdělují na tzv. on-grid systémy a hybridní systémy. Každý tento fotovoltaický systém je vhodný pro rozdílné aplikace podle způsobu využití elektrické energie.

### 2.1 Ostrovní (off-grid) fotovoltaický systém

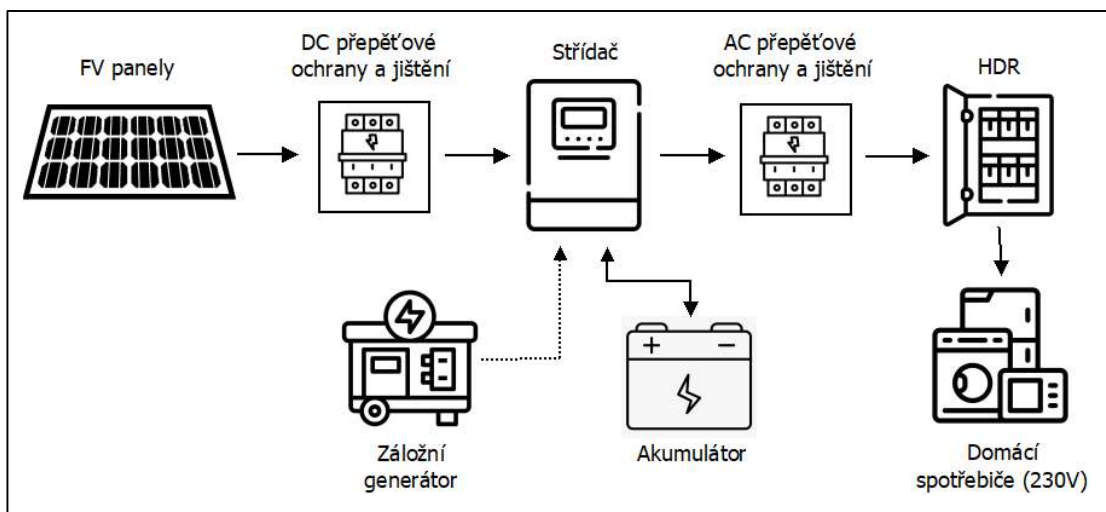
Ostrovní (off-grid) systém je uzavřeným a autonomním systémem, který není spojen s distribuční sítí. Používá se pro napájení objektů v odlehlých oblastech bez možnosti připojení k elektrické síti, jak už z technického nebo ekonomického hlediska. Tím můžou být například chaty. Ostrovní systém musí být vhodně navržen na danou aplikaci, aby byl schopen generovat dostatek elektrické energie na provoz po celý rok. Někdy tento systém bývá doplněn záložním zdrojem elektrické energie, například záložním generátorem. Ostrovní systém obsahuje komponenty:

- fotovoltaické moduly včetně konstrukce
- střídač nebo regulátor dobíjení
- akumulátor
- kabely a elektrotechnický materiál
- záložní generátor (pouze volitelně)

Elektrická energie vyrobená fotovoltaickými moduly se buď rovnou spotřebovává v místě spotřeby nebo je akumulována v bateriích. Jednoduché instalace nemají střídač, ale pouze regulátor dobíjení a všechny spotřebiče v tomto systému jsou připojeny na stejnosměrné napětí (obvykle 12 nebo 24 V). Pokud bychom chtěli napájet klasické spotřebiče na střídavé napětí (230 V, 50 Hz), použijeme napěťový střídač. Akumulátory slouží pro akumulaci

energie pro její následné použití v čase, kdy FVE nevyrobí dostatečnou elektrickou energii, například v noci nebo při špatném počasí. Akumulátor je nejdražší komponentou celého ostrovního FV systému, jehož cena se s nárůstem velikosti kapacity akumulátorů zvyšuje. Proto je vhodné používat co nejvíce úsporných spotřebičů. Blokové schéma ostrovního systému fotovoltaické elektrárny je znázorněno na obrázku 2.1. [28]

Do systému může být zakomponován i záložní generátor jako záložní zdroj elektrické energie. Ten umožňuje napájení objektu během dlouhého nepříznivého počasí, především v zimě. To umožňuje snížit velikost kapacity akumulátorů a tím i snížit celkovou cenu ostrovního FV systému. Velikost generátoru by měla být dostatečná pro napájení objektu a zároveň nabíjení akumulátorů. [29]



Obrázek 2.1: Blokové schéma ostrovního (off-grid) systému

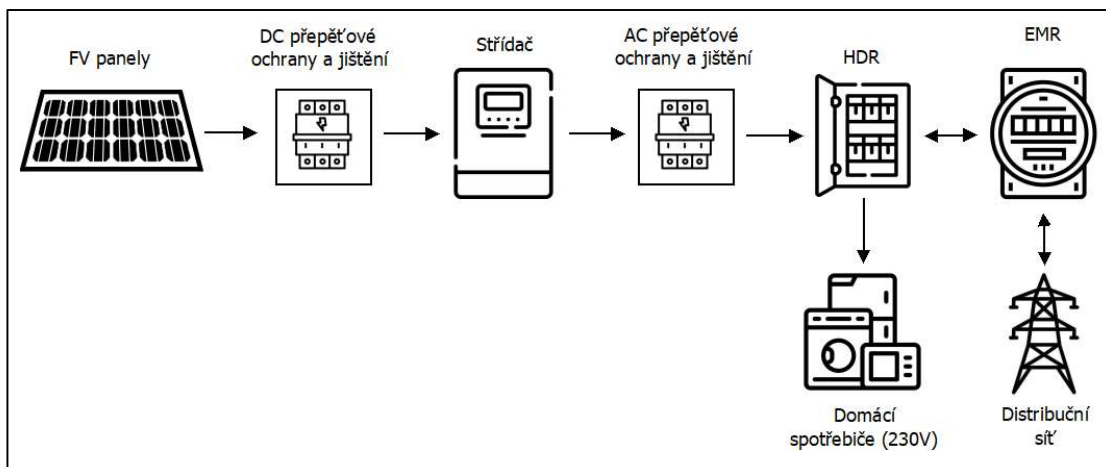
## 2.2 On-grid fotovoltaický systém

On-grid systém je nejpoužívanějším a nejjednodušším FV systémem. Podstatou tohoto systému je spojení s distribuční sítí. Elektrická energie pro provoz objektu je poté spotřebována jak z vyrobené elektrické energie pomocí FVE, tak i z distribuční sítě. Tedy, pokud má FV systém přebytečnou energii, dodává ji do distribuční sítě a naopak, pokud vyrobená energie z FVE je nedostačující pro napájení objektu, zbytek potřebné elektrické energie je odebírán z distribuční sítě. To má ale i svá úskalí. Jelikož je tento FV systém připojen do distribuční sítě, musí splňovat požadavky distributora pro připojení takového zdroje. To znamená, že je na daném odběrném místě možno připojit fotovoltaickou

elektrárnu o daném výkonu. To může být s velkým nárůstem počtu instalovaných fotovoltaických elektráren problémem, zvláště v oblastech, kde jich je už nainstalovaných velké množství. Tedy distribuční soustava na to musí být dimenzovaná a mít volnou kapacitu na připojení takového zdroje. On-grid FV systém obsahuje komponenty:

- fotovoltaické moduly včetně konstrukce
- střídač
- kabely a elektrotechnický materiál
- čtyřkvadrantní elektroměr umístěný v EMR
- elektroměr FVE (volitelně)
- regulátor pro akumulaci přebytečné energie (volitelně)

Na obrázku 2.2 můžeme vidět blokové schéma on-grid fotovoltaické elektrárny. Kvůli napojení tohoto systému do distribuční sítě je nutné místo klasického elektroměru osadit tzv. čtyřkvadrantní elektroměr, který umí měřit tok energie oběma směry a je umístěn v elektroměrovém rozvaděči. Tento elektroměr je majetkem distributora. Často se do tohoto systému zahrnuje i elektroměr fotovoltaické elektrárny, který měří výrobu dané elektrárny. Tento elektroměr slouží pro majitele pouze pro informaci o vyrobené elektrické energii. Systém může být doplněn také o regulátor pro akumulaci přebytečné energie na ohřev TUV. To zlepšuje využití elektrické energie tohoto FV systému.



Obrázek 2.2: Blokové schéma on-grid systému

On-grid fotovoltaická elektrárna může být zapojena dvěma způsoby. První z nich preferuje dodávku vyrobené elektrické energie z FVE pro vlastní spotřebu objektu a druhý z nich preferuje dodávku energie do distribuční sítě. V prvním případě se tedy část vyrobené energie spotřebuje v místě spotřeby (v HDR) a přebytečná energie je dodána do distribuční sítě (přes EMR). To je využíváno pro fotovoltaické elektrárny instalované na střeších budov, tato varianta je právě znázorněna na obrázku 2.2. V druhém případě je všechna vyrobená elektrická energie z FVE dodávána do distribuční sítě (na obrázku 2.2 si odmyslíme HDR). Toto zapojení se používá pro FVE instalované na loukách a polích.

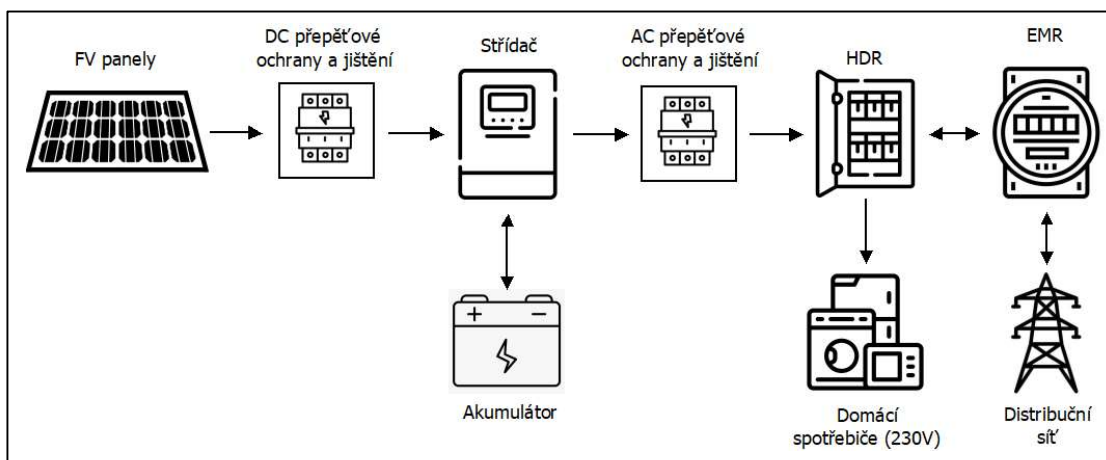
Výhodou on-grid FV systému je jeho cena a jednoduchost. Nevýhodou je to, že se musí vyrobená elektrická energie z fotovoltaické elektrárny ihned spotřebovat v místě spotřeby, jinak bude dodána do distribuční sítě. Dnešní výkupní ceny elektrické energie nejsou natolik velké, aby se export přebytků energie z FVE ve větším množství vyplatil. Výpadek nebo vypnutí distribuční sítě způsobí i vypnutí fotovoltaické elektrárny. [3]

### 2.3 Hybridní fotovoltaický systém

Hybridní systém kombinuje vlastnosti obou předchozích systémů. Tento FV systém je spojen s distribuční sítí, jako on-grid systém, ale zároveň obsahuje i akumulátory pro uložení přebytečné vyrobené energie, jako systém off-grid. Hybridní FV systém slouží pro maximalizaci využití vyrobené elektrické energie v místě spotřeby. Prioritně je vyrobená elektrická energie spotřebovávána aktuální spotřebou objektu, přebytečná energie se ukládá do akumulátorů, ze kterých je využita v případě potřeby tak, aby bylo co nejméně elektrické energie odebráno z distribuční sítě. Pro ještě lepší využití vyrobené energie může být systém osazený regulátorem pro akumulaci přebytečné energie na ohřev TUV. Hybridní systém tedy obsahuje komponenty:

- fotovoltaické moduly včetně konstrukce
- střídač
- kabely a elektrotechnický materiál
- akumulátor
- čtyřkvadrantní elektroměr
- elektroměr FVE (volitelně)
- regulátor pro akumulaci přebytečné energie (volitelně)

Blokové schéma hybridního systému je znázorněno na obrázku 2.3. Hybridní systém musí splňovat požadavky a vlastnosti spojené s připojením do distribuční sítě, jako u on-grid systému. Nejvíce se tento systém instaluje u rodinných domů, kde je většinou nízká spotřeba objektu přes den, když je výroba elektrické energie fotovoltaickou elektrárnou největší. Proto systém zahrnuje akumulátory, které opět prodražují celý FV systém, jelikož patří mezi nejdražší komponenty celého systému. Výhodou hybridního FV systému je možnost odpojení od distribuční sítě při výpadku dodávky elektrické energie z distribuční sítě. Poté funguje jako off-grid systém. V tomto případě je energie pro provoz objektu čerpaná z akumulátorů, které slouží na napájení především důležitých spotřebičů, pro které je výpadek energie nežádoucí. Baterie ovšem nesmí být vybité. Většinou obsahuje střídač speciální výstup pro tuto funkci zálohy (bývá označováno i jako back-up). [29]



Obrázek 2.3: Blokové schéma hybridního systému

### 3 Stanovení parametrů FV elektrárny v modelovém místě

Pro stanovení parametrů fotovoltaické elektrárny jsou potřeba prvotní informace o modelovém místě. To znamená popis modelového místa geografickou polohou a klimatickými podmínkami. S tím souvisí i popis okolního prostředí, zda se zde vyskytují vysoké kopce, stromy či budovy, které by mohli mít vliv na zastínění. Zároveň je nutné popsat jednotlivé budovy a stanovit dostupné plochy střech s jejich orientací a sklonem, na které lze navrhovat umístění FV modulů. Jedním z nejdůležitějších vstupních parametrů je určení tzv. zátěžového profilu objektu, který definuje spotřebu elektrické energie. Podle tohoto profilu bude následně navrhována fotovoltaická elektrárna pro co nejefektivnější využití vyrobené elektrické energie.

Po získání těchto vstupních informací můžeme navrhnout FVE s konkrétními parametry. K tomu potřebujeme zvolit konkrétní komponenty od daného výrobce s danými technickými parametry. Proto bude závěr kapitoly věnován výběru konkrétního produktu jednotlivých komponent fotovoltaické elektrárny od daného výrobce.

#### 3.1 Modelové místo

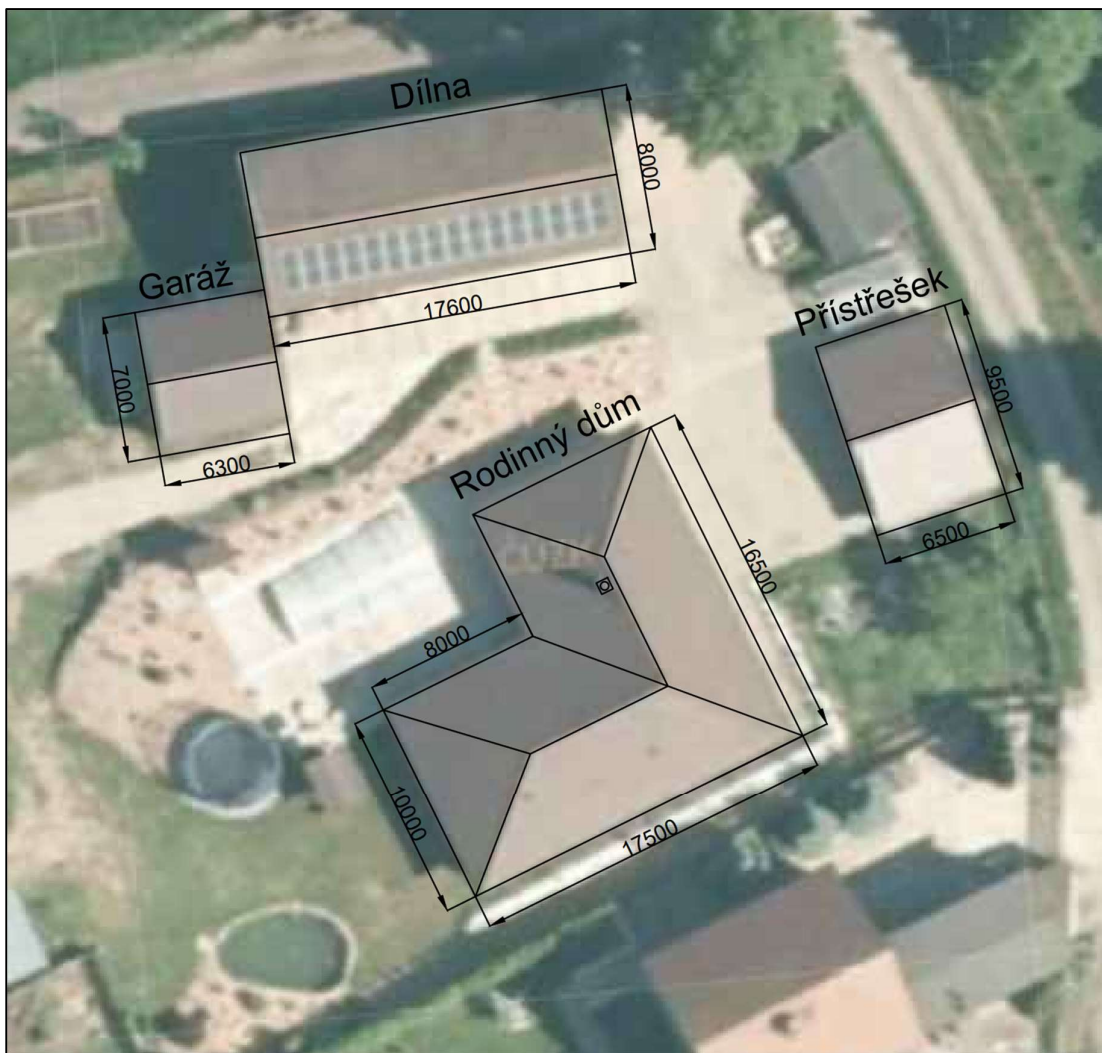
Modelové místo se nachází ve vesnici Bošice nedaleko města Vimperk v jižních Čechách. Na tomto pozemku je postaven rodinný dům společně s garáží, dílnou a přístřeškem pro auta. Modelové místo se nachází v nadmořské výšce 610 metrů nad mořem. Směrem na východ od objektu najdeme kopec Hůrka o nadmořské výšce 662 m.n.m. vzdálený zhruba 430 metrů od objektu. Na jižní stranu terén postupně stoupá, přibližně 1,47 km od objektu téměř na jih se nachází kopec s názvem Mařský vrch s nadmořskou výškou 907 m.n.m.

Rodinný dům má tvar písmene L, jedná se o nově postavený bungalov. Více na sever od domu se nachází dílna a garáž, na východ od domu poté přístřešek na auta. Situace je znázorněna na obrázku 3.1 níže, který je výstřížkem z mapových podkladů s doplněnými rozměry jednotlivých střech. Z tohoto obrázku vidíme, že je zde několik střešních ploch, které jsou výhodné pro instalaci FV modulů vzhledem k jejich orientaci. Jedná se o téměř jižní strany střech domu, garáže, dílny i přístřešku pro auta, poté téměř západní či východní stranu střechy domu. Popis jednotlivých střech s jejich orientací (jih = 0°), sklonem, krovem a krytinou je uveden v následující tabulce 3.1.



Tabulka 3.1: Přehled jednotlivých střech v modelovém místě

Sřecha	Orientace (°)	Sklon (°)	Krov	Krytina
Dílna	-10	10	Krokve (10x14 cm)	Betonová taška
Garáž	-10	30	Krokve (10x12 cm)	Plechová
Přístřešek na auta	-18	20	Krokve (10x12 cm)	Plechová
Dům – východ	-115	25	Sbíjený vazník	Betonová taška
Dům – jih	-25	25	Sbíjený vazník	Betonová taška
Dům – západ	65	25	Sbíjený vazník	Betonová taška



Obrázek 3.1: Výstřižek z mapových podkladů modelového místa včetně rozměrů jednotlivých střech

### 3.1.1 Průměrná teplota a srážky, sluneční svit

Modelové místo je vhodné taky popsat z pohledu klimatických podmínek. V následující tabulce 3.2 jsou uvedeny průměrné hodnoty teploty a průměrné hodnoty srážek v horizontu pěti let od roku 2018 do roku 2023 za jednotlivý kalendářní měsíc. Uvedená data jsou získána z českého hydrometeorologického ústavu [30] z meteorologické stanice Vimperk, která je vzdálena zhruba 6 km vzdušnou čarou od modelového místa.

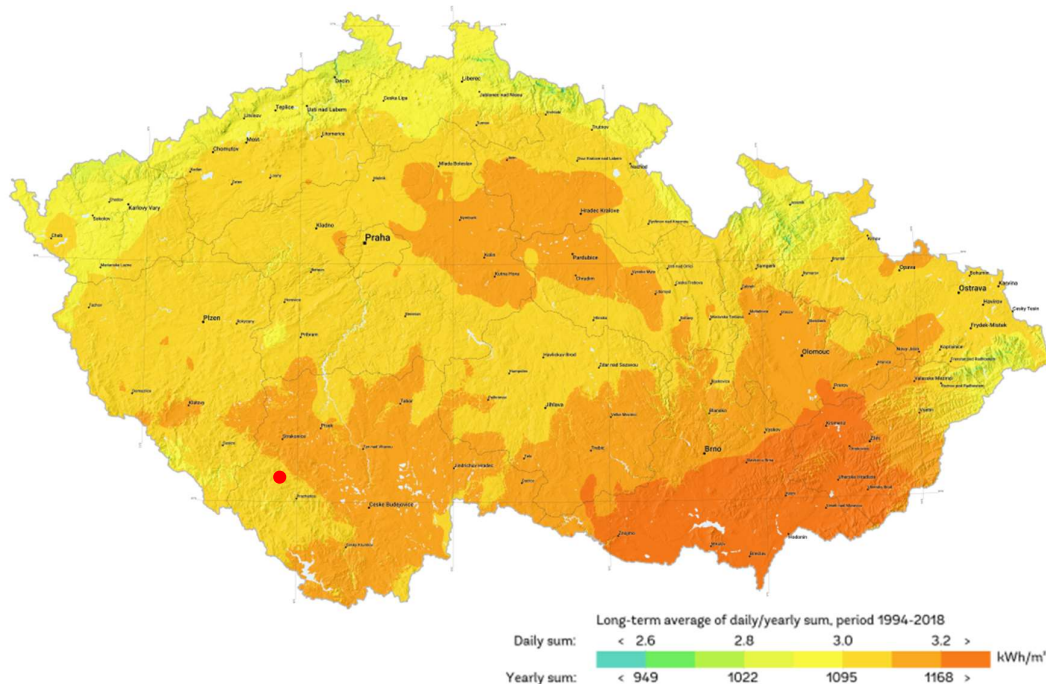
Pro návrh fotovoltaické elektrárny jsou důležitější informace týkající se doby slunečního svitu a průměrné hodnoty dopadajícího slunečního svitu za daný kalendářní měsíc. Tyto hodnoty jsou uvedeny opět v tabulce 3.2. Opět jsou hodnoty uvedeny jako průměr hodnot za pět let od roku 2018 do roku 2023. Hodnoty slunečního svitu jsou získány z ČHMÚ [30] z meteorologické stanice České Budějovice a hodnoty doby slunečního svitu jsou získány z meteorologické stanice Husinec. Uvedené hodnoty slunečního svitu v tabulce jsou přepočtené z poměru dob slunečního svitu získané z meteorologické stanice České Budějovice a z meteorologické stanice Husinec tak, aby odpovídaly meteorologické stanici Husinec. Tím jsou tyto hodnoty přiblíženy reálným hodnotám v modelovém místě, které se nachází mnohem blíže k Husinci (přibližně 11 km vzdušnou čarou) než k Českým Budějovicím (přibližně 48 km vzdušnou čarou).

Tabulka 3.2: Tabulka klimatických podmínek v modelovém místě získané z ČHMÚ

<b>Kalendářní měsíc</b>	<b>Průměrná teplota (°C)</b>	<b>Průměrné srážky (mm/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Doba slunečního svitu (h)</b>	<b>Hodnota slunečního svitu (kWh/m<sup>2</sup>)</b>
Leden	-0,24	49,98	45,64	20,73
Únor	0,30	47,98	86,32	45,50
Březen	1,98	32,78	138,70	85,50
Duben	6,74	32,72	205,32	134,36
Květen	10,72	83,12	170,24	142,37
Červen	16,38	156,30	221,66	161,75
Červenec	16,64	65,30	229,10	164,02
Srpen	16,22	99,84	201,36	136,10
Září	11,78	51,18	163,56	96,23
Říjen	8,12	37,24	117,92	58,08
Listopad	2,42	38,40	55,06	25,83
Prosinec	0,30	45,66	36,24	16,09

### 3.1.1.1 Sluneční mapa

Pro lepší představu bylo vybrané modelové místo vyznačeno v tzv. sluneční mapě, která je znázorněna na obrázku 3.2. Modelové místo je označeno červeným bodem v této mapě. Tato mapa ukazuje hodnotu ročního slunečního svitu v kWh/m<sup>2</sup> pro Českou republiku. Z této mapy vidíme, že nejvíce slunečního svitu je na jižní Moravě, naopak nejméně pak na severu Čech. Modelové místo se nachází v místě se zhruba průměrnou hodnotou slunečního svitu pro Českou republiku.



Obrázek 3.2: Sluneční mapa ČR

### 3.1.2 Zátěžový profil domu v modelovém místě

Jedním z nejdůležitějších vstupních parametrů pro návrh fotovoltaické elektrárny je zátěžový profil objektu neboli spotřeba elektrické energie. Zátěžový profil může představovat například roční spotřebu elektrické energie, případně měsíční, týdenní či denní spotřebu elektrické energie. Roční spotřeba udává pouze informaci o celkové spotřebě elektrické energie za rok, ale nezjistíme z ní detailnější informace, jako spotřebu elektrické energie v čase. Naopak z denního zátěžového profilu zjistíme přesnou spotřebu elektrické energie v průběhu dne a na tento průběh můžeme přesně navrhovat parametry fotovoltaické elektrárny. Tento návrh bude poté mnohem přesnější a navržený pro efektivní využití vyrobené elektrické energie pro spotřebu daného objektu.

Pro sestavení denního zátěžového profilu rodinného domu v modelovém místě je využit způsob, při kterém jsou zjištěny všechny (nebo alespoň ty podstatné) instalované spotřebiče s daným nebo alespoň přibližným výkonem a přibližnou dobou použití v průběhu dne. Po konzultaci s majitelem rodinného domu došlo k sestavení tabulky 3.3, kde je uveden seznam spotřebičů. Ke každému spotřebiči je uveden výkon a přibližné použití v hodinách za den s konkrétními hodiny použití během dne. V posledním sloupci je uvedena spotřeba spotřebiče přepočtená na jednu hodinu provozu podle toho, jak dlouho se spotřebič používá. Sestavení tabulky 3.3 nese s sebou několik zjednodušujících předpokladů a zanedbání. Tím může být například to, že jednotlivé spotřebiče se nepouštějí každý den ve stejný čas nebo to, že se spotřebiče nespouštějí vždy po stejně dlouho dobu. Jde tedy o průřez nejčastějšího používání těchto spotřebičů v daných časech a s příslušnou dobou spuštění.

Tabulka 3.3: Seznam spotřebičů v domě s jejich výkonem a použitím

Seznam spotřebičů	Počet	Výkon [W]	Přibližné použití (hod/den)	Přibližná hodina použití	Spotřeba za hodinu [Wh]
Světla (LED) <sup>3</sup>	26	13,4	3	6, 20, 21	116
TV	1	120	2	21, 22	60
PC/mobil	3	30	1	18	90
Lednice/mrazák	1	20	24	0–24	20
Myčka	1	2000	1	18	2000
Pračka	1	2000	1	18	2000
Sušička	1	1800	1	19	1800
Bojler	1	2000	3	15, 16, 20	2000
Bazén – filtrace	1	200	9	9–18	200
Vířivka/sauna <sup>4</sup>	1	6000	0,43	19	2580
El. trouba	1	4000	0,5	11, 17	2000
Varná deska	1	4000	1	11, 17	4000
Mikrovltnka	1	1000	0,25	17	250
Varná konvice	1	2000	0,25	7, 17	500
Digestoř	1	250	0,5	11	125
Kávovar	1	1200	0,25	7, 15	300
El. gril	1	2000	0,25	17	500
Router	1	12	24	0–24	12
Čistička, ČOV	1	40	24	0–24	40
Zvonkové trafo	1	8	24	0–24	8
Standby spotřebiče	10	5	24	0–24	50

<sup>3</sup> Počítáno se soudobostí, koeficient soudobosti  $\beta = 0,33$ . To znamená, že v danou hodinu je rozsvícena vždy pouze třetina světel.

<sup>4</sup> Sezónní spotřebiče. Podle ročního období je spuštěna vířivka nebo sauna. Výkon mají stejný, využití je zhruba 1 hodinu 3x týdně, tedy za 1 den je spuštění spotřebiče na 0,43 hodiny.

Z tabulky 3.3 byla následně sestavena tabulka 3.4, která udává spotřebu elektrické energie domu za jednotlivou hodinu. Jde tedy o průměr odebíraného výkonu za danou hodinu. Pokud sečteme spotřebu za celý den, vyjde denní spotřeba objektu 25,98 kWh. Pokud budeme uvažovat tuto spotřebu každý den v celém roce, vyjde nám poté roční spotřeba elektrické energie 9,48 MWh. Reálná roční spotřeba objektu je mezi 9 až 10 MWh za rok. To znamená, že sestavená spotřeba objektu v modelovém místě dle jednotlivých spotřebičů a jejich použití koresponduje s reálnou spotřebou.

Tabulka 3.4: Spotřeba domu za jednotlivou hodinu

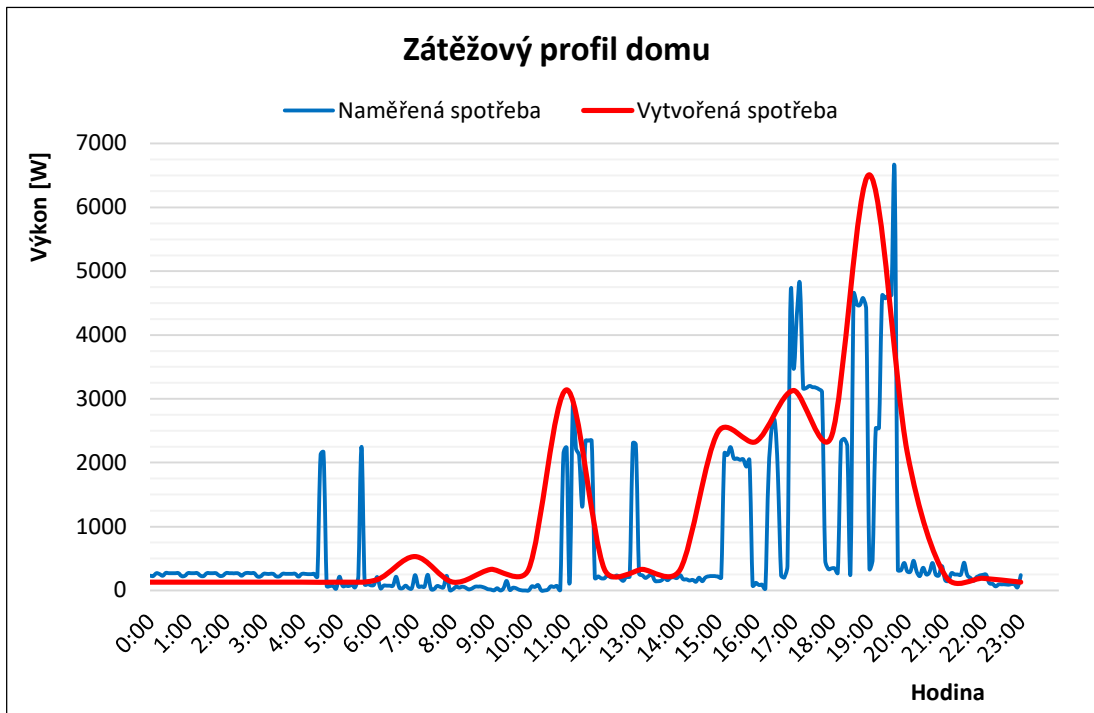
Hodina	Spotřeba [Wh]	Hodina	Spotřeba [Wh]
0:00	130	12:00	330
1:00	130	13:00	330
2:00	130	14:00	330
3:00	130	15:00	2480
4:00	130	16:00	2330
5:00	130	17:00	3130 <sup>5</sup>
6:00	168	18:00	2420
7:00	530	19:00	6510
8:00	130	20:00	2168
9:00	330	21:00	228
10:00	330	22:00	190
11:00	3142 <sup>6</sup>	23:00	130

Z tabulky 3.4 je následně vykreslena závislost spotřeby elektrické energie za jeden den. Tento průběh je znázorněn na obrázku 3.3 červenou barvou. Tento průběh je sestaven z průměru spotřeby za jednotlivou hodinu a nebude tedy obsahovat výraznější výkonové špičky. Následně jsem pro přesnější data spotřeby elektrické energie v průběhu dne umístil do rozvaděče v modelovém místě měřicí modul, ze kterého jsem získal hodnoty odebíraného výkonu v intervalu 5 minut. Tyto data byla naměřena 11.10.2023. Tento průběh je opět zobrazen na obrázku 3.3, tentokrát modrou barvou. Tento průběh obsahuje výraznější změny hodnot kvůli odečtení spotřeby el. energie každých pět minut. Z porovnání průběhů vidíme,

<sup>5</sup> Započítána soudobost kuchyňských spotřebičů, koeficient soudobosti  $\beta = 0,9$ .

<sup>6</sup> Započítána soudobost kuchyňských spotřebičů, koeficient soudobosti  $\beta = 0,7$ .

že vytvořený průběh zátěžového profilu podle seznamu spotřebičů a jejich využití téměř kopíruje průběh reálné naměřené spotřeby elektrické energie.



Obrázek 3.3: Denní zátěžový profil modelového místa

### 3.1.2.1 Optimalizace zátěžového profilu

Z obrázku 3.3 je zřejmé, že většina spotřeby je mezi 15. a 20. hodinou. To vzhledem k výrobě FVE není úplně ideální. Pro efektivnější využití elektrické energie z FVE existuje několik variant, avšak ta nejjednodušší je vhodné upravení denního zátěžového profilu. Tato úprava spočívá v optimalizaci využití jednotlivých spotřebičů. Tím je myšleno zapínání spotřebičů, jako například pračka, myčka či sušička v odpoledních hodinách v čase, kdy je výroba elektrické energie z fotovoltaické elektrárny nejvyšší (pro orientaci FV modulů na jih). Tuto optimalizaci jsem následně aplikoval na spotřebiče, kde lze snadno upravit jejich čas spuštění. Konkrétně došlo k úpravě přibližné hodiny použití u spotřebičů:

- TV – hodina použití: 20 a 21
- PC/mobil – hodina použití: 15
- Myčka – hodina použití: 12
- Pračka – hodina použití: 12
- Sušička – hodina použití: 14

- Vířivka/sauna – hodina použití: 10
- Varná konvice – hodina použití: 8 a 17
- Kávovar – hodina použití: 8 a 15

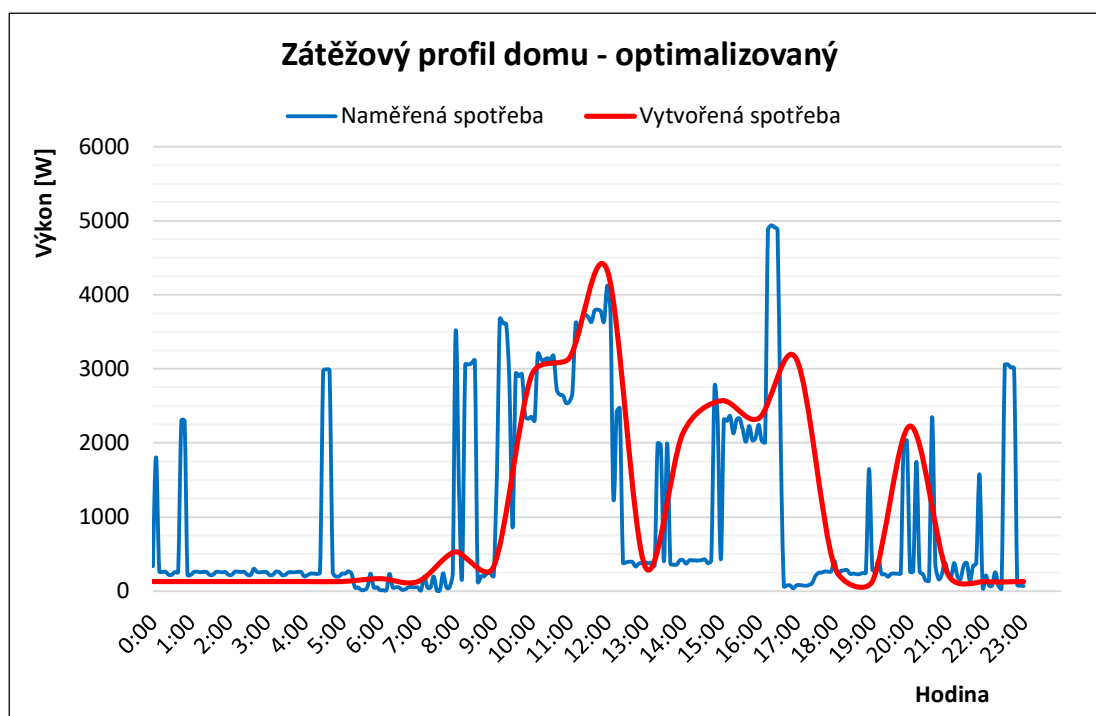
Z těchto úprav byla sestavena nová tabulka 3.5 se spotřebou domu za jednotlivou hodinu. Z této tabulky byl následně opět vykreslen průběh spotřeby elektrické energie za 24 hodin, který je zobrazen červenou barvou na obrázku 3.4. Na tomto obrázku je modrou barvou opět zobrazen průběh naměřené spotřeby elektrické energie měřicím modulem ze dne 27.10.2023 se stejným měřicím intervalem. Při změření tohoto průběhu byly aplikované úpravy doby spuštění jednotlivých spotřebičů, například pomocí funkce odloženého startu daného spotřebiče. Z obrázku 3.4 je zřejmé, že většina spotřeby elektrické energie je mezi 10. a 13. hodinou a poté mezi 15. a 17. hodinou. Avšak mezi 13. a 15. hodinou je spotřeba minimální. To ale může záviset na konkrétním dni nebo třeba na nepřítomnosti obyvatelů v objektu apod. Tento průběh je o něco příznivější vzhledem k výrobě elektrické energie FVE pro její efektivnější využití.

Tabulka 3.5: Spotřeba domu za jednotlivou hodinu - optimalizovaný zátěžový profil

Hodina	Spotřeba [Wh]	Hodina	Spotřeba [Wh]
0:00	130	12:00	4330
1:00	130	13:00	330
2:00	130	14:00	2130
3:00	130	15:00	2570
4:00	130	16:00	2330
5:00	130	17:00	3130 <sup>7</sup>
6:00	168	18:00	330
7:00	130	19:00	130
8:00	530	20:00	2228
9:00	330	21:00	228
10:00	2910	22:00	130
11:00	3142 <sup>8</sup>	23:00	130

<sup>7</sup> Započítána soudobost kuchyňských spotřebičů, koeficient soudobosti  $\beta = 0,9$ .

<sup>8</sup> Započítána soudobost kuchyňských spotřebičů, koeficient soudobosti  $\beta = 0,7$ .



Obrázek 3.4: Optimalizovaný denní zátěžový profil modelového místa

### 3.2 Určení základní parametrů FV elektrárny

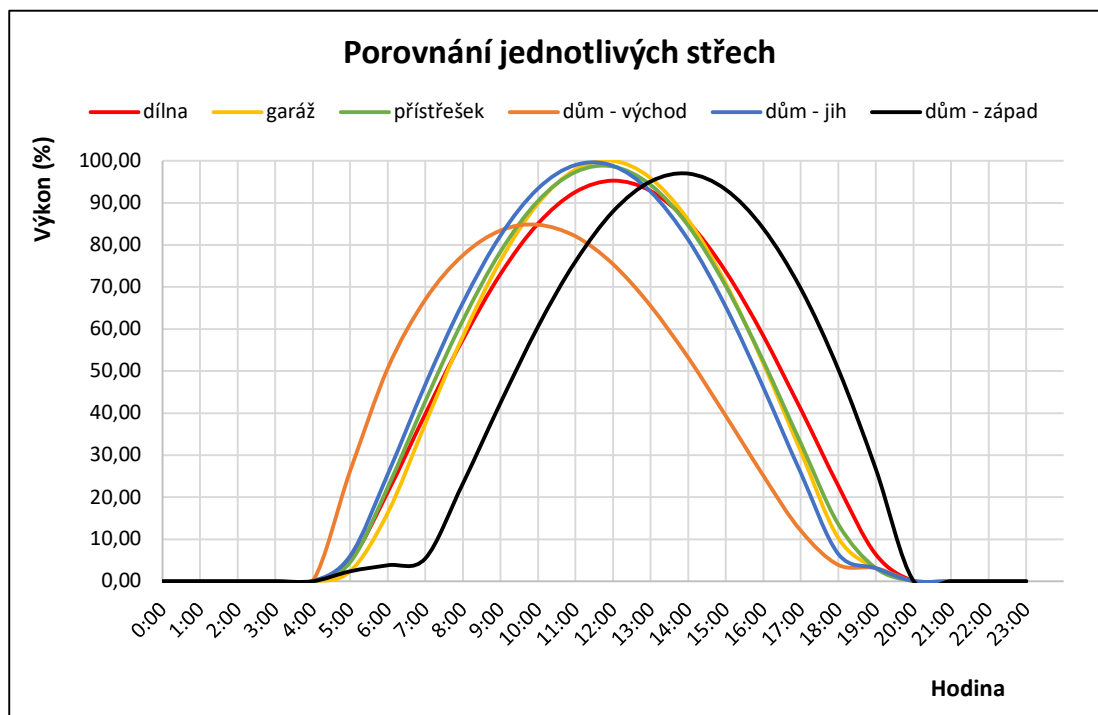
Pro určení základních parametrů FVE budu vycházet z optimalizovaného zátěžového profilu. Budu tedy předpokládat, že se elektrická energie bude spotřebovávat podle tohoto profilu každý den po celý rok. V této části práce se budu zabývat umístění FV modulů na dané střeše, tedy orientací a sklonem FV modulů, jejich počtem a v důsledku toho i celkovým výkonem FVE. Následně bude k danému výkonu přiřazen odpovídající střídač. Také se budu zabývat akumulací energie do baterií a v poslední řadě akumulací přebytečné energie na ohřev TUV. To bude následně zhodnoceno z energetického i z ekonomického hlediska a následně bude určena finální konfigurace FVE v modelovém místě.

#### 3.2.1 Výběr FV modulů a jejich vhodného rozložení

Jednotlivé plochy střech v modelovém místě jsou různě orientovány a mají různý sklon (více viz. Tabulka 3.1). Na základě toho budou mít FV moduly umístěné na těchto různých plochách střech jiný průběh teoretické výroby elektrické energie. Tyto průběhy jsou znázorněny na obrázku 3.5. Vykreslené průběhy jsou získány ze softwaru PVsyst se zanedbáním vlivu počasí a vlivu teploty. Tedy jde spíše o idealizované průběhy, které jsou vykresleny pro letní období. Pro zimní období by byly průběhy odlišné jak v amplitudě, tak



v kratším časovém intervalu. Jednotlivé průběhy by tedy byly nižší a kratší. Zároveň by se projeví více rozdíly mezi světovými stranami a mezi rozdílným sklonem střech.



Obrázek 3.5: Porovnání průběhů idealizované výroby na jednotlivých střechách

Vzhledem k orientaci střech vychází nejlépe střechy garáže a dílny, jelikož mají orientaci téměř na jih ( $-10^\circ$ ). Nejvýhodnější sklon má poté střecha garáže, kde se sklon ( $30^\circ$ ) blíží ideálnímu sklonu pro ČR ( $35^\circ$ ). Tedy střecha garáže se zdá jako nejvýhodnější z hlediska výroby elektrické energie za celý rok. Hned v závěsu je jižní střecha domu (azimut  $-25^\circ$ , sklon  $25^\circ$ ) a střecha přístřešku na auta (azimut  $-18^\circ$ , sklon  $20^\circ$ ). Bohužel jižní střecha domu je zastíněna jiným domem. Naopak východní strana domu vypadá nejhůře z hlediska celkové výroby elektrické energie. Střecha dílny má sice dobrou orientaci, ale velmi malý sklon střechy (pouze  $10^\circ$ ). Avšak při návrhu musíme uvažovat i zátěžový profil domu. Cílem návrhu FVE není maximální vyrobená elektrická energie za rok, ale co nejlepší pokrytí spotřeby domu v modelovém místě.

Výběr vhodného umístění FV modulů je velmi složitý, proto budou zvoleny různé varianty, které budou mezi sebou následně porovnány a bude vybrána ta nejlepší varianta vzhledem k efektivnosti pokrytí spotřeby elektrické energie. Jak již bylo znázorněno na obrázku 3.4, většina spotřeby elektrické energie modelového místa je dle zátěžového profilu mezi 10.

a 13. hodinou a poté mezi 15. a 17. hodinou. Velikost spotřeby elektrické energie se nachází mezi 10. a 13. hodinou v rozmezí 3 až 4 kW, následně mezi 15. a 17. hodinou zhruba 2,5 kW s krátkou výkonovou špičkou blížící se k hodnotě 5 kW. Vzhledem k uvedenému zátěžovému profilu je zřejmé, že pro spotřebu mezi 10. a 13. hodinou je vhodné umístění FV modulů na střechu s téměř jižní orientací a pro spotřebu mezi 15. a 17. hodinou je výhodnější umístění FV modulů na střechy s téměř západní orientací. To bude následně respektováno při konkrétních variantách návrhu FVE. Před samotným návrhem jednotlivých variant je vhodné vybrat konkrétní FV moduly kvůli jejich technickým parametrům.

### 3.2.1.1 Výběr FV modulů

Výběr FV modulů je velmi náročný proces, jelikož existuje mnoho výrobců. Mezi největší světové výrobce FV modulů lze zařadit firmy Jinko Solar, Trina Solar, LONGi Solar, JA Solar, Canadian Solar nebo třeba DAS Solar. Každá z firem má široké portfolio FV modulů s různými výkonovými variantami, proto je výběr konkrétního FV modulu velmi náročný. Pro můj návrh jsem si zvolil výrobce LONGi Solar, protože znám některé z jejich FV modulů z praxe. Dalším důvodem tohoto výběru je dostupnost FV modulů od tohoto výrobce v ČR. Pro výběr konkrétního FV modulu jsou také důležité jeho elektrické a mechanické vlastnosti. Pro mě budou důležité elektrické parametry jako špičkový výkon, napětí  $U_{MPP}$  či  $U_{OC}$  a dále mechanické parametry jako rozměr FV modulu. Budu vybírat FV moduly s relativně vysokým napětím  $U_{MPP}$  či  $U_{OC}$ , aby bylo potřeba co nejméně FV modulů spojených do jednoho stringu pro dosažení potřebného startovacího napětí střídače. Velikost FV modulu zase ovlivňuje jejich počet pro osazení na danou plochu střechy.

Pro tuto práci jsem si zvolil FV moduly s typovým označením LR5-66HTH-525M. Jedná se o monokrystalické FV moduly se špičkovým výkonem o hodnotě 525 Wp. Tyto FV moduly mají i dostatečně velkou účinnost, která je přes 22 %. Zároveň mají tyto moduly relativně nízký teplotní koeficient  $U_{OC}$ . Vybrané technické parametry FV modulu LONGi Solar LR5-66HTH-525M jsou uvedeny v tabulce 3.6, které jsou získány přímo z technického listu FV modulu. Kompletní technický list FV modulů je uveden v přílohách (viz. Příloha 1).

Tabulka 3.6: Vybrané technické parametry FV modulu LONGi Solar LR5-66HTH-525M

Špičkový výkon $P_{MAX}$	525 W	Rozměry (v/š/h)	2094/1134/35 mm
Provozní napětí $U_{MPP}$	40,06 V	Hmotnost	26 kg
Provozní proud $I_{MPP}$	13,11 A	Počet FV článků	132
Napětí naprázdno $U_{OC}$	47,73 V	Teplotní koeficient $P_{MAX}$	-0,29 %/°C
Proud nakrátko $I_{SC}$	14,12 A	Teplotní koeficient $U_{OC}$	-0,23 %/°C
Účinnost FV modulu	22,1 %	Teplotní koeficient $I_{SC}$	0,050 %/°C
Max. napětí systému	1500 V	Pracovní teplota	-40 až 85 °C

### 3.2.1.2 Návrh jednotlivých výkonových variant FVE

Jak už bylo zmíněno, budu se zaměřovat při návrhu FVE na tři střechy, na jižní střechu garáže, západní střechu domu a téměř jižní střechu přístřešku na auta. První variantou bude osazení FV modulů pouze na střechu garáže. Jižní strana střechy garáže má rozměr 630 cm na šířku a 350 cm na výšku. Bude osazeno 9 ks FV modulů, jelikož se na střechu více FV modulů nevejde kvůli rozměrům. FV moduly budou umístěné horizontálně do třech řad a třech sloupců a zaberou plochu 6282 mm na šířku a 3402 mm na výšku. Celkový výkon bude 4725 Wp.

Další čtyři varianty budou vždy kombinací jižní orientace a západní orientace, tedy střechy garáže a západní střechy domu, které se budou lišit pouze počtem FV modulů. V prvním případě bude na střechu garáže osazeno 6 FV modulů a střechu domu také 6 FV modulů. FV moduly na střeše domu budou rozdělené po třech kusech na dvě plochy západní orientace střechy. Celkový výkon bude 6300 Wp. V druhém případě bude na střechu garáže i na střechu domu osazeno 7 FV modulů. Celkový výkon bude 7350 Wp. Ve třetím případě této kombinace střech bude na střechu garáže osazeno 9 FV modulů a na západní střechu domu 7 FV modulů. Celkový výkon bude 8400 Wp. V poslední variantě bude na střechu garáže osazeno 9 FV modulů, ten samý počet FV modulů bude osazen i na západní střechu domu. Na západní straně střechy domu budou FV moduly rozděleny na dvě plochy v počtu pěti a čtyřech kusů. Celkový výkon této varianty bude 9450 Wp.

Co se týká rozměrů, tak se daný počet FV modulů pro všechny varianty vždy vejde na danou plochu střechy, případně na dvojici střech (západní strana domu). Pro větší přehlednost a pro porovnání jednotlivých návrhů byly navrženy varianty uvedeny do následující tabulky 3.7.

Tabulka 3.7: Porovnání jednotlivých variant návrhu FVE

Varianta návrhu		1	2	3	4	5
Střešní plocha 1	Počet panelů	9	6	7	9	9
	Orientace	-10°	-10°	-10°	-10°	-10°
	Sklon	30°	30°	30°	30°	30°
Střešní plocha 2	Počet panelů	-	6	7	7	9
	Orientace	-	65°	65°	65°	65°
	Sklon	-	25°	25°	25°	25°
Celkový výkon (Wp)		4725	6300	7350	8400	9450

### 3.2.2 Výběr vhodného střídače

Před vložením jednotlivých variant návrhů rozmístění FV modulů do softwaru PVsyst je nutné ke každé variantě zvolit odpovídající střídač. Smysl navržení vhodného střídače je v tom, že střídač by neměl být předimenzovaný, ale naopak ani poddimenzovaný. To znamená, že by jeho velikost výstupního výkonu měla odpovídat celkovému výkonu FV modulů. Tím je zajištěna i vysoká účinnost blízké maximální účinnosti střídače.

Opět existuje široká škála výrobců střídačů, kde každý jednotlivý střídač má odlišné vlastnosti a technické parametry. Mezi ty největší a nejznámější výrobce střídačů můžeme zařadit například SMA Solar Technology, Fronius, SolarEdge, Solax Power nebo například Huawei. Pro mojí diplomovou práci jsem si zvolil střídače od značky Solax Power, protože je nejprodávanějším výrobcem střídačů v ČR v roce 2023 [31]. To, že jde o kvalitní značku také potvrzuje získané prestižní ocenění „Top Brand PV“, které výrobce získal už po třetí v řadě [31]. Dalším důvodem tohoto výběru je znalost tohoto střídače a jeho celého systému z praxe.

Ke každé variantě návrhu počtu FV modulů a jejich celkového výkonu zvolím adekvátní výkonovou variantu střídače. Budu vybírat on-grid střídač, konkrétně z řady X3-MIC G2, která obsahuje výkonové varianty střídačů od 3 kW až po 15 kW. Všechny výkonové varianty střídače jsou asymetrické. Důvodem výběru on-grid střídače je prvotní návrh FVE bez baterií. Zda bude výhodnější hybridní systém s hybridním střídačem a s bateriemi budu řešit až po návrhu optimálního výkonu FVE.

K první variantě návrhu výkonu FVE dle tabulky 3.7 s celkovým výkonem 4725 Wp jsem vybral střídač s výkonem 5 kW, konkrétně s označením X3-MIC-5.0-T-D. Pro druhou variantu jsem vybral silnější střídač s výkonem 6 kW s označením X3-MIC-6.0-T-D. Pro třetí a čtvrtou variantu návrhu výkonu FVE vybírám opět silnější střídač, který má výkon 8 kW, označení střídače je X3-MIC-8.0-T-D. Pro poslední variantu vybírám střídač o výkonu 10 kW s označením X3-MIC-10.0-T-D. Přiřazení střídačů o daném výkonu k jednotlivým variantám je uvedeno v následující tabulce 3.8.

Tabulka 3.8: Zvolení výkonu střídače k jednotlivým variantám

Varianta návrhu	1	2	3	4	5
Celkový výkon (Wp)	4725	6300	7350	8400	9450
Výkon střídače (W)	5 000	6000	8000	8000	10000

U některých variant je výkon střídače nižší, než je výkon fotovoltaické elektrárny. Proto byly všechny varianty ověřeny pomocí on-line nástroje Solax Design<sup>9</sup>, který je dostupný přímo od výrobce navrhovaných střídačů. Po kontrole všech variant výkonu FVE se zapojením na konkrétní střídače nástroj nevyhodnotil žádnou chybu. Teoreticky může nastat situace, že střídač bude ořezávat výkon FVE pouze na svůj maximální výstupní výkon, který je možný dodat do elektrické sítě. To by ale prakticky nastat nemělo, protože jednotlivé FV pole mají jinou orientaci dle umístění na příslušné střechy. Vzhledem k tomu by nemělo dojít k maximálnímu výkonu obou FV polí v jednom okamžiku.

Jednotlivé výkonové varianty střídače jsou si svými technickými parametry dost podobné a odlišnosti jsou pouze ve výstupním a vstupním výkonu. Vybrané parametry z technické listu pro všechny výkonové varianty střídače jsou uvedeny v tabulce 3.9. Kompletní technický list všech zmíněných výkonových variant střídačů je uveden v přílohách (viz. Příloha 2).

---

<sup>9</sup> On-line software, který je dostupný z: <https://design.solaxcloud.com>

Tabulka 3.9: Vybrané technické parametry střídače Solax Power X3-MIC G2<sup>10</sup>

Nominální AC výstupní výkon	5/6/8/10 kW
Nominální střídavé napětí	230/400 V
Nominální frekvence	50/60 Hz
Euro účinnost	97,8 %
Max. účinnost	98,3 %
Noční spotřeba	<3 W
Provozní teplota	-30 až 60 °C
Max. příkon FV pole	10/12/16/20 kWp
Max. vstupní napětí	1000 V
Startovací napětí	120 V
Rozsah napětí MMPT	120–980 V
Počet MPPT	2
Max. vstupní proud MPPT1/MPPT2	16/16 A
Max. zkrat. proud MPPT 1/MPPT2	18/18 A

---

<sup>10</sup> Hodnoty uvedené v tabulce se liší dle výkonové varianty střídače. Jedná se o parametry „Nominální AC výstupní výkon“ a „Max. příkon FV pole“. Hodnoty jsou uvedené pro střídače vždy v tomto pořadí: Solax Power X3-MIC-5.0-T-D/Solax Power X3-MIC-6.0-T-D/Solax Power X3-MIC-8.0-T-D/ Solax Power X3-MIC-10.0-T-D.

## 4 Simulace navržených variant FVE

Všechny varianty návrhu FVE byly vloženy do softwaru PVsyst společně s optimalizovaným zátěžovým profilem a klimatickými podmínkami modelového místa. Společně s tím byl definován horizont v modelovém místě, který udává úhel zastínění okolním prostředím. Následně byly namodelovány všechny budovy v modelovém místě, na které byly umístěny FV moduly dle jednotlivých variant návrhu. FV moduly byly následně propojeny do jednotlivých stringů. Nakonec byla ke každé variantě navrženého systému FVE doplněna i cena tohoto systému a následně došlo ke spuštění simulace. Výsledky jednotlivých variant byly poté mezi sebou porovnány a byla zvolena nejefektivnější výkonová varianta FVE.

### 4.1 Popis prostředí softwaru PVsyst

Po založení projektu v softwaru PVsyst se zobrazí úvodní stránka, která je zobrazena na obrázku 4.1. V horní části, která je označena modrým pruhem nalevo, jsou upravovány data týkající se celého projektu. Nachází se zde i stanovení meteorologických dat pro dané místo instalace, zde tedy byly vloženy data z meteorologických stanic uvedené v tabulce 3.2.

Dolní část obrazovky, která je označena oranžovým pruhem nalevo, slouží pro návrh samotného systému FVE. Před spuštění simulace je nutné nejdříve vyplnit všechny údaje do jednotlivých segmentů pod hlavičkou označenou „Main parameters“ (Hlavní parametry). Tedy musíme vyplnit segmenty:

- Orientation (Orientace)
- System (Systém)
- Detailed losses (Detailní ztráty)
- Self-consumption (Vlastní spotřeba)
- Storage (Uložiště)

Segment „Orientation“ obsahuje zadání orientace FV modulů a jejich sklon. Lze vybrat z různých typů konstrukcí. Pro moji simulaci byla vybrána konstrukce s pevným sklonem pro umístění FV modulů na danou střešní plochu. Segment „System“ obsahuje výběr FV modulů, jejich počet, spojení FV modulů do jednotlivých stringů a výběr střídače. Jelikož v této verzi softwaru PVsyst nebyly vybrané FV moduly součástí databáze, vytvořil jsem

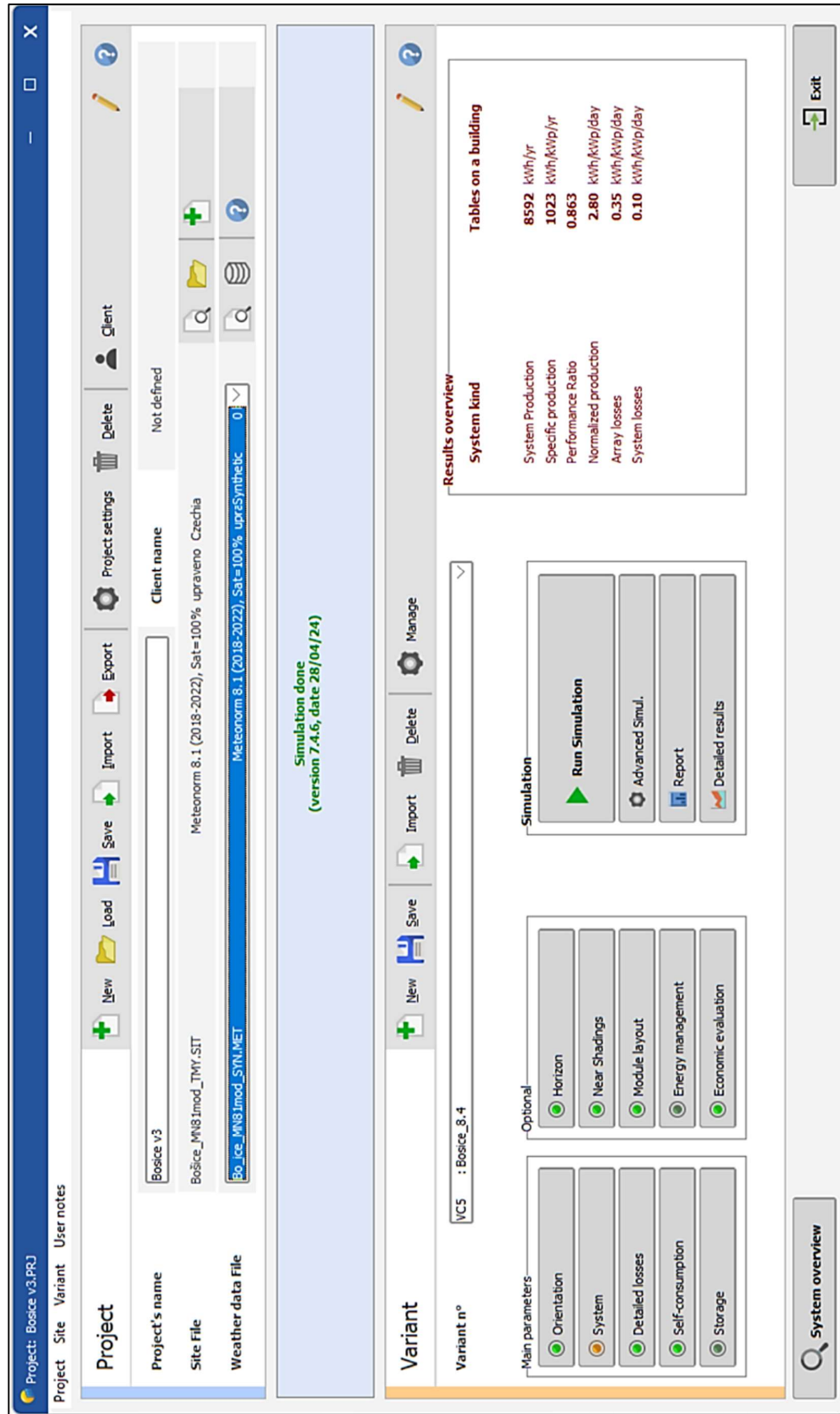
technickou specifikaci vybraných FV modulů dle jejich technického listu manuálně. V dalším segmentu „Detailed losses“ bylo definováno, že FV moduly budou instalovány volně na konstrukci s přirozenou cirkulací vzduchu. Dalším důležitým segmentem je „Self-consumption“, který obsahuje definici spotřeby objektu, na který je FVE navrhována. Můžeme vybrat z různých variant, já jsem vybral definování spotřeby elektrické energie pomocí denního profilu. Zde byl tedy vložen optimalizovaný zátěžový profil modelového místa, který byl vytvořen ve třetí kapitole. Poslední segmentem je „Storage“, kde se definuje bateriové uložení. Vzhledem k tomu, že zatím navrhuji on-grid systém, zvolil jsem FV systém bez bateriového uložení.

V tuto chvíli je už možné spustit simulaci FV systému, ale také lze ještě definovat další volitelné parametry pro přesnější výsledky a přiblížení výsledků více k realitě. Tyto parametry jsou označeny jako „Optional“ (Volitelné), můžeme dále definovat:

- Horizon (Horizont)
- Near Shadings (Blízké stíny)
- Module layout (Uspořádání modulů)
- Energy management (Řízení energie)
- Economic evaluation (Ekonomické hodnocení)

„Horizon“ definuje horizont, který je dán okolním prostředím simulovaného místa. Tedy zda nevádí slunečnímu svitu okolní krajina. Horizont byl importován pomocí webového nástroje PVGIS 5.2, který je součástí softwaru PVSyst. V dalším segmentu „Near shadings“ byly namodelovány jednotlivé budovy v modelovém místě včetně blízkých okolních stínících objektů, jako stromy a okolní domy. Dále zde byly definovány FV pole a jejich umístění na příslušnou střechu. Pomocí segmentu „Module layout“ je definováno elektrické propojení jednotlivých FV modulů do stringů. To je provedeno dle návrhu jednotlivých výkonových variant. Segment „Energy management“ slouží pro definici parametrů distribuční sítě a limitů dodávky elektrické energie do této sítě. Zde nebylo nic definováno. Posledním segmentem je „Economic evaluation“, kde lze definovat všechny záležitosti týkající se ekonomiky. Lze definovat ceny jednotlivých komponent včetně podružných prací nebo vedlejšího materiálu, poté lze určit provozní náklady, stanovit financování nebo vložit výkupní a nákupní ceny elektřiny a dalších finančních záležitostí. Výsledkem je výpočet návratnosti FV systému a finanční analýza uvedená pro každý rok provozu FVE.





Obrázek 4.1: Úvodní stránka projektu v softwaru PVsyst

## 4.2 Stanovení optimální výkonové varianty FVE

Výstup ze simulace jednotlivých variant návrhu FVE obsahuje mnoho výsledků. Z těchto výsledků jsem vybral pouze ty nejdůležitější pro určení té nejvhodnější varianty návrhu. Jedná se především o energetické výsledky, tedy o hodnoty vyrobené elektrické energie, spotřebované energie, energie dodané do distribuční sítě a energie odebrané z distribuční sítě. Tyto hodnoty jsou uvedené v tabulce 4.1 a jedná se o roční hodnoty. Dále je v tabulce uveden výkonnostní poměr (Perfection Ratio nebo zkráceně PR), který udává poměr efektivně vyrobené (použité) energie s ohledem na energii, která by byla vyrobena, kdyby systém pracoval nepřetržitě při STC. Následně je v tabulce uvedená i cena navrhovaného FV systému, která byla získána z cenové nabídky instalační firmy. Detailní ceny dle jednotlivých položek budou uvedeny u finální konfigurace FVE.

Tabulka 4.1: Vybrané výsledky simulace z PVsyst pro porovnání jednotlivých variant

Varianta návrhu	1	2	3	4	5
Výkon FVE (Wp)	4725	6300	7350	8400	9450
EArray <sup>11</sup> (kWh)	5176,8	6639,0	7743,0	8891,0	9953,0
E_User <sup>12</sup> (kWh)	9484,9	9484,9	9484,9	9484,9	9484,9
E_Solar <sup>13</sup> (kWh)	3329,7	4072,3	4357,3	4581,6	4790,3
E_Grid <sup>14</sup> (kWh)	1718,5	2407,0	3205,2	4115,2	4932,0
E_Grid <sup>15</sup> (kWh)	6155,2	5412,5	5127,6	4903,3	4694,6
Perf. Ratio <sup>16</sup> (%)	86,63	87,31	87,34	87,37	87,34
Cena systému (Kč)	187 099,01	209 955,76	226 514,74	241 158,40	257 989,54
Návratnost (let)	10,0	9,2	9,1	9,1	9,2

Cena FV systému byla vložena do softwaru PVsyst společně s cenami pro nákup či výkup elektrické energie. Cena za nákup elektrické energie byla stanovena dle tarifu pro modelové místo zprůměrováním ceny vysokého a nízkého tarifu. Výkupní cena byla stanovena dle aktuální výkupní ceny od E.ON. Nákupní cena elektřiny se tedy rovná 5,33 Kč/kWh

<sup>11</sup> Effective energy at output of the array (Efektivní hodnota vyrobené energie na výstupu z FV pole)

<sup>12</sup> Energy supplied to the user (Energie dodávaná uživateli neboli spotřeba domu)

<sup>13</sup> Energy from the sun (Energie ze Slunce neboli spotřebovaná energie ze slunce)

<sup>14</sup> Energy injected into grid (Energie dodávaná do distribuční sítě)

<sup>15</sup> Energy from the grid (Energie odebíraná z distribuční sítě)

<sup>16</sup> Perfection Ratio (Výkonnostní poměr) – poměr efektivně vyrobené (použité) energie s ohledem na energii, která by byla vyrobena, kdyby systém pracoval nepřetržitě při STC. PR je definován v normě IEC EN 61724.

a výkupní cena elektřiny se rovná 0,5 Kč/kWh. Do simulace byla také zanesena aktuální hodnota inflace uvedená Českou národní bankou, jejíž hodnota je 2 % ročně. Cena celého FV systému je stanovena včetně DPH, které činí 12 %. Pro simulaci nebyly zatím zaneseny provozní náklady ani náklady na výměnu střídače.

Po simulaci všech variant FVE byly následně získány hodnoty návratnosti daného systému. Nejeftivnější variantu návrhu FVE jsem vybíral podle následujících kritérií. Vyrobena energie FVE by měla být nižší, než je spotřeba objektu, aby nebyl celý FV systém předimenzovaný. S tím souvisí i celková cena FVE. Energii spotřebovanou ze Slunce, respektive z výroby FVE, chci co největší. Energii dodávanou do distribuční sítě chci co nejmenší a energii odebíranou z distribuční sítě chci také co nejmenší. Zároveň chci dodat více vyrobené elektrické energie do spotřeby modelového místa než do distribuční sítě. Dalším vypovídajícím parametrem je hodnota PR, kterou chci co nejvyšší. Posledním kritériem, které je dost důležité, je návratnost celého FV systému, kterou chci samozřejmě co nejnižší.

Po zhodnocení všech zmíněných kritérií výběru FVE byla zvolena jako nejeftivnější varianta č. 4 s celkovým výkonem FVE 8400 Wp. Tato varianta má nejlepší PR, nejnižší návratnost a spotřebovanou energii z výroby FVE pro spotřebu domu vyšší, než je energie dodávaná do distribuční sítě.

### **4.3 Výběr typu FV systému**

Zatím byl systém FVE navrhován jako on-grid. Nabízí se tedy otázka, zda nebude výhodnější hybridní FV systém s bateriovým uložištěm, ve kterém se může uchovávat přebytečná energie z FVE, která je u on-grid systému dodávaná do distribuční sítě. Další možností je ukládání těchto přebytků energie do vody pomocí regulátoru pro akumulaci přebytečné energie na ohřev TUV. Obě možnosti využití přebytků energie zvyšují využití vyrobené elektrické energie fotovoltaickou elektrárnou. Je jen otázkou, zda je toto zlepšení výhodné vzhledem k navýšení ceny celého FV systému. Těmito záležitostmi se budu zabývat v následujících částech práce.

### 4.3.1 Porovnání on-grid a hybridního systému

Pro hybridní systém je nutné použít i hybridní střídač, který umožňuje připojení baterií. Opět vybírám střídač od výrobce Solax Power z řady hybridních střídačů X3-HYBRID G4, tyto střídače jsou už ve čtvrté generaci a jejich výkonová řada je od 5 do 15 kW. Porovnání FV systémů budu provádět pouze na zvolené výkonové variantě FVE s výkonem 8400 Wp, proto vybírám střídač o výkonu 8 kW stejně jako u on-grid FV systému. Střídač má typové označení X3-HYBRID-8.0-D a má podobné technické parametry jako on-grid střídač. Technický list střídače je uveden v přílohách (viz. Příloha 3).

S výběrem hybridního střídače souvisí i výběr vhodné baterie. Kvůli bezproblémovému připojení baterie ke střídači volím baterie od výrobce Triple Power (také označované jako Solax Triple Power), jelikož střídač nepodporuje připojení některých typů baterií, například od jiných výrobců. Z modelové řady volím baterii s označením T30. Její velikost (kapacitu) volím vzhledem k velikosti střídače a k celému výkonu FVE. Zároveň musím mít na paměti, že předimenzování velikosti baterie s sebou nese vyšší investiční náklady. Proto volím velikost baterie o něco nižší, než je výkon navržené FVE, konkrétně tedy budou instalované dva kusy této baterie se jmenovitou kapacitou 3,1 kWh. Celková kapacita baterie tedy bude 6,2 kWh (6,1 kWh dle údaje od výrobce), celé toto bateriové uložení se také označuje T-BAT H 6.0 V2. Vybrané technické parametry tohoto bateriového uložení jsou uvedeny v tabulce 4.2, celý technický list baterie je uveden v přílohách (viz. Příloha 4). Bateriové uložení se skládá z dvou baterií (označované jako HV10230) a z jedné řídicí jednotky, tzv. BMS (označované jako MC0600). Baterie je typu LFP, tedy neobsahuje žádné toxické kovy ani žiraviny.

Tabulka 4.2: Vybrané technické parametry baterie Triple Power T30

Jmenovitá kapacita	30 Ah	Standartní výkon	5,1 kW
Celková energie	6,1 kWh	Max. nabíjecí/vybíjecí proud	30 A
Využitelná energie	5,5 kWh	Doporučený nabíjecí/vybíjecí proud	25 A
Jmenovité napětí	204,8 V	Počet cyklů (90 % DOD, 25 °C)	6000
Provozní napětí	180–232 V	Účinnost baterie (0,2C při 25 °C)	95 %
Maximální výkon	6,1 kW	Teplotní rozsah pro nabíjení/vybíjení	-10 až 50 °C <sup>17</sup>

<sup>17</sup> Bez funkce vyhřívání. S funkcí vyhřívání je rozsah teplot pro nabíjení/vybíjení -30 až 50 °C.

To vše bylo opět vloženo do softwaru PVsyst. Pro hybridní systém se změnil střídač a přidala se zmiňovaná baterie, s tím se změnila i cena celého FV systému. Hybridní střídač je dražší, než on-grid střídač. Cena hybridního střídače Solax Power X3-HYBRID-8.0-D je 35 642 Kč bez DPH, zatímco cena on-grid střídače Solax Power X3-MIC-8.0-T-D je 21 453 Kč bez DPH. Cenu hybridního FV systému ale především navyšují baterie. Cena bateriového uložení Triple Power T30 (T-BAT H 6.0 V2) je 60 418 Kč bez DPH. Pro porovnání jednotlivých systémů byla sestavena tabulka 4.3. U hybridního systému jde tedy o významný nárůst celkové ceny, která je v tabulce uvedena včetně DPH (12 %). V tabulce jsou uvedené energetické výsledky simulace z PVsyst. Výsledky simulace opět nezahrnují provozní náklady ani náklady na výměnu střídače nebo baterií.

Tabulka 4.3: Porovnání on-grid a hybridního systému

<b>Systém FVE</b>	<b>On-grid</b>	<b>Hybridní</b>
EArray <sup>18</sup> (kWh)	8891,0	8891,0
E_User <sup>19</sup> (kWh)	9484,9	9484,9
E_Solar <sup>20</sup> (kWh)	4581,6	5817,1
E_Grid <sup>21</sup> (kWh)	4115,2	2571,3
EFrGrid <sup>22</sup> (kWh)	4903,3	3667,8
Cena střídače (Kč)	21 453,00	35 642,00
Cena baterií (Kč)	0,00	60 418,00
Cena systému (Kč)	241 158,40	324 718,80
Návratnost systému	9,1 let	10,0 let

Z výsledků simulace jednotlivých FV systémů uvedené v tabulce 4.3 vidíme, že u hybridního systému došlo k navýšení spotřeby elektrické energie vyrobené fotovoltaickou elektrárnou. Zároveň se snížila hodnota energie, která je odebírána z distribuční sítě. Energie dodávaná do distribuční sítě je také snížila. Tedy došlo k efektivnějšímu využití elektrické energie z FVE. Z tohoto pohledu je hybridní systém výhodnější, než systém on-grid. Druhou stránkou mince je navýšení ceny hybridního systému a otázka, zda má efektivnější využití elektrické energie smysl vzhledem k navýšení ceny. Kompletní cena hybridního systému je

<sup>18</sup> Effective energy at output of the array (Efektivní hodnota vyrobené energie na výstupu z FV pole)

<sup>19</sup> Energy supplied to the user (Energie dodávaná uživateli neboli spotřeba domu)

<sup>20</sup> Energy from the sun (Energie ze Slunce neboli spotřebovaná energie ze slunce)

<sup>21</sup> Energy injected into grid (Energie dodávaná do distribuční sítě)

<sup>22</sup> Energy from the grid (Energie odebírána z distribuční sítě)

zhruba o 83 a půl tisíce vyšší, než u systému on-grid. To má významný vliv na návratnost celé investice, která se u hybridního systému navýšila na rovných deset let.

Pokud bychom započítali i provozní náklady, tak by se návratnost jednotlivých FV systémů ještě navýšila. Provozními náklady mohou být například opravy systému nebo revize FVE. Revize FVE by měla být každé čtyři roky, její cena je zhruba 4000 Kč. Vzhledem k tomu, že od výrobce je stanovená záruka na střídače a baterie na deset let, tak musím počítat také s jejich výměnou po uplynutí této doby. Tyto zmíněné náklady mi výrazně ovlivní návratnost FV systému. Pokud vložím do softwaru PVsyst náklady na revizi FV systému, vyjde mi návratnost on-grid systému 9,5 let a návratnost hybridního systému 10,4 let. Pokud navíc započtu náklady spojené s výměnou střídače a baterií po 10 letech, tak vyjde návratnost on-grid systému na 10,5 let a návratnost hybridního systému 16,3 let. To je už významný rozdíl. Náklady na výměnu střídače nebo baterií se v PVsyst rozdělí definovaným horizontem jejich výměny, celková cena je tedy rozložena na každoroční náklady.

I když je využití elektrické energie hybridním systémem lepší než u on-grid systému, tak po započtení finanční stránky vychází pořád výhodněji on-grid FV systém. Proto budu nadále navrhopvat on-grid systém, ale pokusím se využití elektrické energie vylepšit jiným způsobem. Tím je myšlena akumulace přebytečné energie, která je dodávaná do distribuční sítě, na ohřev TUV pomocí regulátoru.

#### **4.3.2 Akumulace přebytečné energie na ohřev TUV**

Pro využití přebytečné elektrické energie je využíván regulátor, který umožní ohřev TUV z těchto přebytků. V modelovém místě je instalovaný jednofázový bojler o objemu 160 litrů s 2 kW topným tělesem pro ohřev TUV. Ačkoliv se to nezdá, tak ohřev TUV spotřebuje poměrně velké množství elektrické energie. Již při tvorbě zátěžového profilu bylo počítáno s ohřevem TUV po dobu třech hodin každý den, to se rovná spotřebě elektrické energie 6 kWh za jeden den. S touto úvahou vyjde roční spotřeba elektrické energie pouze na ohřev TUV na 2190 kWh, což je téměř čtvrtina celé spotřeby objektu v modelovém místě.

Akumulace přebytečné energie na ohřev TUV bude napojena pomocí regulátoru GreenBonO od výrobce YORIX s.r.o., konkrétně půjde o osazení regulátoru s označením GBO-Aku, ke kterému bude připojeno jedno polovodičové relé, které se také označuje SSR. Toto

polovodičové relé má jmenovitou hodnotu proudu 10 A, tedy lze na něj připojit zátěž o výkonu 2300 W. Technický list regulátoru je uveden v přílohách (viz. Příloha 5).

Regulátor GBO-Aku je schopný měřit směr a velikost toku elektřiny na jednotlivých fázích přívodního kabelu mezi připojeným objektem a distribuční sítí. Pokud regulátor zjistí přetok elektrické energie z objektu do distribuční sítě, sepne na svém výstupu SSR, které umožní ohřev TUV v připojeném bojleru. Využití přebytečné energie z FVE je plynule regulováno pomocí pulsní regulace od 0 do 100 % jmenovitého příkonu spotřebiče. Plynulou regulaci zajišťuje regulátor řízením polovodičového relé (SSR).

Přetoky elektrické energie z výroby FVE do distribuční sítě budou především přes letní období, proto budu počítat využití regulátoru pro ohřev TUV pouze na jednu třetinu roku, tedy na čtyři měsíce. V tomto případě by ohřev TUV pomocí přebytků z FVE ušetřil zhruba 730 kWh za rok. Tedy energie z FVE, která by byla spotřebována v modelovém místě by byla o tuto hodnotu navýšena a rovnala by se spotřebě 5311,6 kWh za rok. Naopak energie dodávaná do distribuční sítě by byla o danou hodnotu snížena na 3385,2 kWh za rok, to samé platí i pro energii odebíranou ze sítě, která by byla snížena na hodnotu 4173,3 kWh za rok.

Pokud budu uvažovat, že se z distribuční sítě odebere o 730 kWh méně s nákupní cenou 5,33 Kč/kWh, dojde ke snížení výdajů za nákup elektřiny o 3890,9 Kč ročně. Naopak dojde ke snížení příjmů za výkup elektrické energie s cenou 0,5 Kč/kWh, tedy dojde ke snížení příjmů o 365 Kč za rok. Po spočtení těchto příjmů a výdajů za elektrickou energii vyjde úspora 3525,9 Kč za každý rok. K tomu musíme ještě započítat navýšení ceny FV systému kvůli instalaci regulátoru na ohřev TUV, která činí 10 976 Kč včetně DPH. Jak je to tedy s návratností? Pokud vydělím celkovou cenu původního systému 241 158,40 Kč návratností, která je 9,5 let, vyjde mi za každý rok příjem 25 385,1 Kč. Pokud k tomuto číslu připočtu ušetřených 3525,9 Kč za rok za ohřev TUV přímo z FVE, celkově vyjde roční příjem 28 911,0 Kč. Zároveň ale dojde kvůli instalaci systému na akumulaci přebytečné energie na ohřev TUV k navýšení celkové ceny FV systému na 252 134,40 Kč. Po vydělení této celkové ceny FV systému a ročního příjmu po instalaci systému na akumulaci přebytečné energie na ohřev TUV vyjde návratnost systému na 8,7 let. To je snížení návratnosti o 0,8 roku neboli zhruba o 8,5 %. To lze považovat za dobré zlepšení. Tento výsledek také ukazuje, že se investice do této akumulace přebytečné energie vyplatí. Jde tedy pouze o teoretickou úvahu a výpočet, v praxi může být návratnost lehce odlišná.

Vložení systému pro akumulaci přebytečné energie na ohřev TUV do softwaru PVsyst je složité, jelikož software nenabízí možnost vložení této akumulace. Proto byl tento systém akumulace v softwaru respektován pouze po finanční stránce. Byla tedy upravena výsledná cena fotovoltaického systému. Následně jsem přidal položku do ročních provozních nákladů se záporným znaménkem, která představuje ušetřené náklady za ohřev TUV pomocí přebytků elektrické energie z FVE. Po těchto úpravách vyšla následně návratnost tohoto FV systému ze softwaru PVsyst na 8,6 let. To je rozdíl pouze 0,1 let oproti teoretickému výpočtu. Tento rozdíl mezi teoretickým výpočtem návratnosti a hodnotou návratnosti z PVsyst je nejspíš dán hodnotou roční inflace, která byla do PVsyst zadaná a software s ní počítá. Při teoretickém výpočtu nebyla tato inflace nijak zohledněna.

#### **4.4 Finální konfigurace navržené FVE**

Finální navržená FVE představuje síťový on-grid systém bez baterií, který je doplněný regulátorem pro akumulaci přebytečné energie z FVE na ohřev TUV. Navržená fotovoltaická elektrárna obsahuje 16 ks FV modulů LONGi Solar LR5-66HTH-525M, které jsou rozdělené do dvou stringů o počtu 9 a 7 kusů. 9 FV modulů je umístěno na střechu garáže se sklonem 30° s azimutem -10° od jihu, 7 modulů je umístěno na západní střechu domu o sklonu 25° s azimutem 65°. Celkový výkon FVE je 8,4 kWp. Tento systém dále obsahuje on-grid střídač Solax Power X3-MIC-8.0-T-D a regulátor GBO-Aku, ke kterému je připojeno jedno SSR relé. Navržená FVE je dále doplněna konstrukcí pro ukotvení FV modulů, kabely a elektroinstalačním materiálem.

##### **4.4.1 Ekonomické hledisko a návratnost**

Velmi důležitou záležitostí spojenou s instalací FVE je cena FV systému, která následně udává jeho návratnost. Pro získání ceny FV systému jsem oslovil instalační firmu, která mi poskytla cenovou nabídku, kde jsou uvedené i ceny dílčích komponent a prací. Z této cenové nabídky jsem vytvořil tabulku 4.4, kde je cena instalace fotovoltaické elektrárny rozepsána do jednotlivých položek. Ceny jednotlivých položek jsou uvedené bez DPH, kompletní cena celého systému FVE je poté uvedena včetně DPH, které činí 12 %. Na poslední řádek jsem doplnit informaci o peněžní úspoře při provozu systému pro akumulaci přebytečné energie na ohřev TUV za deset let.



Tabulka 4.4: Rozpis ceny navržené fotovoltaické elektrárny dle položek

<b>Položka</b>	<b>Počet</b>	<b>Cena/jednotku</b>	<b>Celková cena</b>
FV moduly LONGi Solar LR5-66HTH-525M	16	2 590,0 Kč	41 440,0 Kč
Konstrukce pro FV moduly	16	1 782,0 Kč	28 512,0 Kč
Střídač Solax Power X3-MIC-8.0-T-D	1	21 453,0 Kč	21 453,0 Kč
Regulátor GBO-Aku + 1x SSR	1	9 800,0 Kč	9 800,0 Kč
Elektroinstalační materiál	1	33 412,5 Kč	33 412,5 Kč
Elektroinstalační práce	1	62 700,0 Kč	62 700,0 Kč
Revize, projekt FVE	1	10 450,0 Kč	10 450,0 Kč
Doprava materiálu	1	9 652,5 Kč	9 652,5 Kč
Administrace	1	7 700,0 Kč	7 700,0 Kč
<b>Kompletní systém FVE bez DPH</b>			<b>225 120,0 Kč</b>
<b>Kompletní systém FVE včetně DPH</b>			<b>252 134,4 Kč</b>
<b>Úspora za ohřev TUV z přebytečné energie za 10 let</b>			<b>35 259,0 Kč</b>

Návratnost navrženého on-grid FV systému s akumulací přebytečné energie na ohřev TUV vychází na 8,6 let dle výsledku simulace v PVsyst. Pro tuto hodnotu návratnosti bylo počítáno se třetinovým využitím této akumulace za rok. Pokud by bylo využití častější, vyjde návratnost kratší. Dále výpočet zahrnuje provozní náklady na revizi FV systému každé čtyři roky rovnající se částce 4 000 Kč. Při výpočtu nebylo počítáno s výměnou střídače, který má záruku od výrobce stanovenou na 10 let. Lze tedy počítat s jeho výměnou zhruba po deseti letech. V PVsyst nejde definovat náklady na výměnu střídače až po uplynutí deseti let, ale náklady na tuto výměnu jsou rozloženy do každoročních provozních nákladů. Pokud tedy zadám výměnu střídače po deseti letech do PVsyst, vyjdou každoroční náklady na výměnu střídače 2 145,3 Kč. Následně dojde k navýšení návratnosti z 8,6 let na 9,4 let. Z těchto výsledků také vyplývá, že pokud ušetřím každoročně 28 911,0 Kč při provozu FVE a zároveň cena střídače je 21 453,0 Kč, tak si ušetřím peníze na výměnu střídače ještě před jeho výměnou. Tedy celkové příjmy po deseti letech budou i se započtením výměny střídače větší než výdaje na instalaci a provoz FV systému za horizont deseti let.

Do hry vstupují ještě dotační programy, které umožňují snížit vlastní náklady na instalaci FVE. Pokud bych tedy využil dotace na tento fotovoltaický systém dle aktuálních podmínek uvedených na webových stránkách „Nová zelená úsporám“ [32] a platných od 15.2.2024, tak se návratnost FV systému razantně sníží. Jak moc? Výše ceny dotace by byla pro

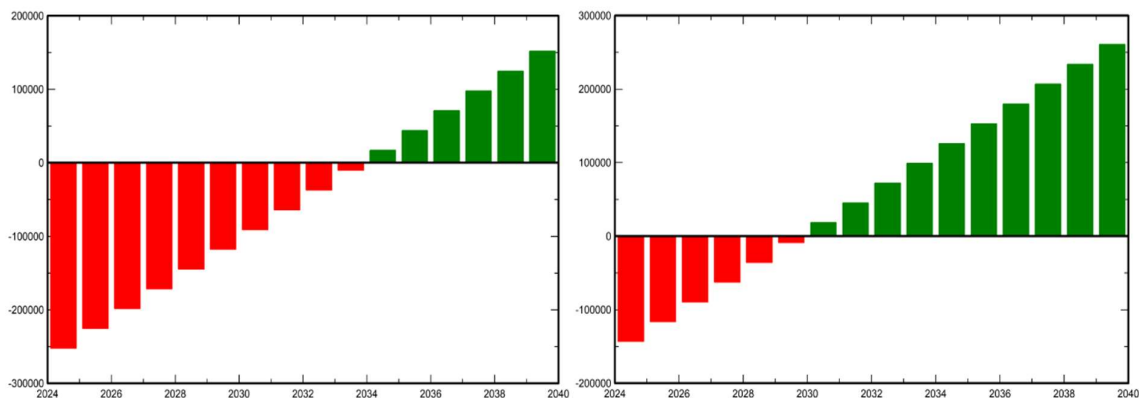
navrhovanou on-grid FVE ve výši 109 000 Kč, což je zhruba 43 % celkové ceny FV systému. Po zadání této ceny dotace do softwaru PVsyst vyjde návratnost FV systému na 5,3 let. Při tomto výpočtu bylo počítáno jak s provozními náklady, tak i s výměnou střídače po deseti letech. Cena dotace tedy významně zlepšuje návratnost FV systému o 4,1 let.

Porovnání ekonomického hlediska z každoročního pohledu pro různé varianty FV systému je uvedeno v tabulce 4.5. Výsledky jsou uvedeny pro 15 let provozu FVE, nulový rok provozu představuje instalaci FV systému, tedy vlastní náklady na tuto instalaci. Všechny zmíněné varianty FV systému počítají s provozními náklady včetně výměny střídače po deseti letech. Kumulativní zisk je zisk při provozu FVE se započítáním vlastních nákladů na její instalaci. To samé je zobrazeno ve sloupečku zisk, který je pouze uveden v procentech. V druhém sloupci je uveden systém bez akumulace přebytečné energie na ohřev TUV. Ve třetím sloupci je uveden FV systém s akumulací přebytečné energie na ohřev TUV. V posledním sloupci jsou zobrazeny výsledky stejného FV systému, jako ve čtvrtém sloupci, ale se započtením ceny dotace. Ke každému systému je uvedena i návratnost spočítaná podle softwaru PVsyst zahrnující roční hodnotu inflace.

Z výsledků uvedených v tabulce 4.5 je zřejmé, že FV systém doplněný akumulací přebytečné energie na ohřev TUV zlepšuje využitelnost elektrické energie a zároveň snižuje výdaje na provoz objektu, respektive zvyšuje zisk vlivem provozu FVE. To je vidět přímo z tabulky, když se podíváme na horizont deseti let, tak FV systém s ohřevem TUV má větší zisk než FV systém bez tohoto ohřevu. Přitom je fotovoltaický systém bez ohřevu TUV levnější. Pokud navíc snížíme vlastní počáteční náklady na instalaci FVE započtením ceny dotace, vyjde nám kladný zisk už při šestém roku provozu FVE a po deseti letech je tento zisk téměř 126 tisíc korun. Po jedenácti letech se dostaneme na zisk větší, než je počáteční investice na instalaci FVE. U FV systému bez dotace s akumulací přebytečné energie na ohřev TUV se dostaneme na tuto částku až po patnácti letech provozu. Tato částka ale neodpovídá počáteční investici, která je zhruba o sto tisíc vyšší. Porovnání ekonomiky fotovoltaických elektráren můžeme vidět i na obrázku 4.2, kde jsou výsledky z tabulky 4.5 zobrazeny v grafické podobě. Vlevo je zobrazena ekonomika FV systému bez započtení ceny dotace, naopak na pravé straně je znázorněna ekonomika FVE se započtenou cenou dotace, o kterou jsou sníženy vstupní náklady.

Tabulka 4.5: Porovnání ekonomického hlediska různých systémů

Rok provozu	FVE bez ohřevu TUV		FVE s ohřevem TUV		FVE s ohřevem TUV se započtením dotace	
	Kumulativní zisk (Kč)	Zisk (%)	Kumulativní zisk (Kč)	Zisk (%)	Kumulativní zisk (Kč)	Zisk (%)
0	-241 158	0,0	-252 134	0,0	-143 134	0,0
1	-217 828	9,7	-225 276	10,7	-116 276	18,8
2	-194 560	19,3	-198 410	21,3	-89 410	37,5
3	-171 356	28,9	-171 536	32,0	-62 537	56,3
4	-148 218	38,5	-144 655	42,6	-35 655	75,1
5	-125 147	48,1	-117 765	53,3	-8 765	93,9
6	-102 143	57,6	-90 867	64,0	18 132	112,7
7	-79 210	67,2	-63 961	74,6	45 039	131,5
8	-56 347	76,6	-37 046	85,3	71 954	150,3
9	-33 556	86,1	-10 122	96,0	98 877	169,1
10	-10 839	95,5	16 811	10,7	125 810	187,9
11	11 803	104,9	43 752	117,4	152 751	206,7
12	34 368	114,3	70 703	128,0	179 702	225,5
13	56 855	123,6	97 664	138,7	206 663	244,4
14	79 263	132,9	124 634	147,4	233 633	263,2
15	101 588	142,1	151 614	160,1	260 612	282,1
<b>Návratnost</b>	<b>10,5 let</b>		<b>9,4 let</b>		<b>5,3 let</b>	

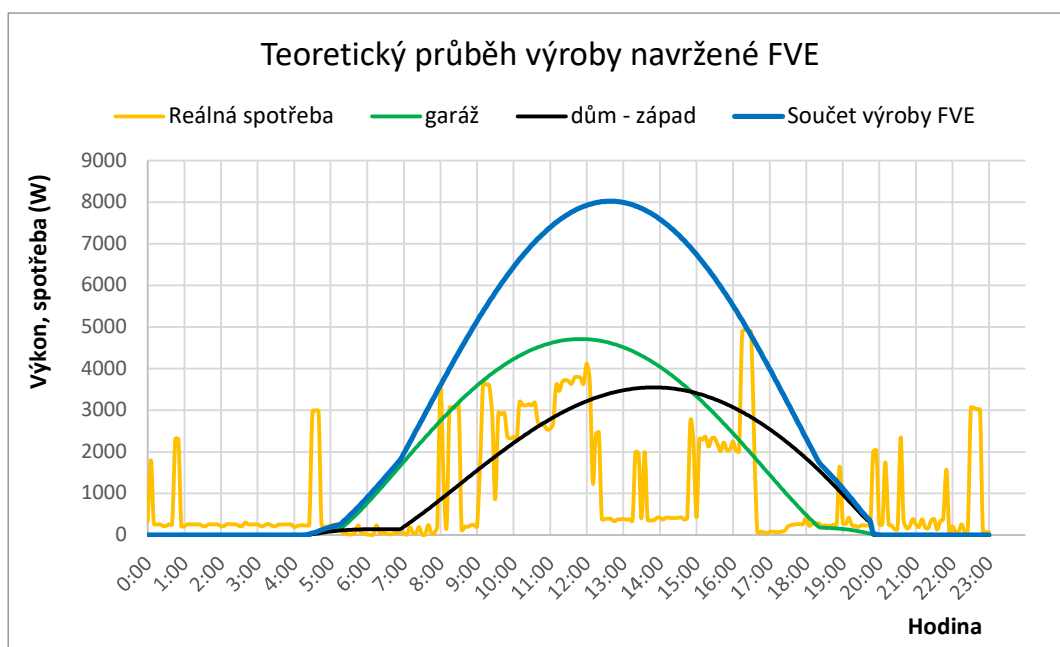


Obrázek 4.2: Grafické porovnání ekonomiky FVE bez dotace a FVE s dotací

#### 4.4.2 Výsledky simulace z PVsyst

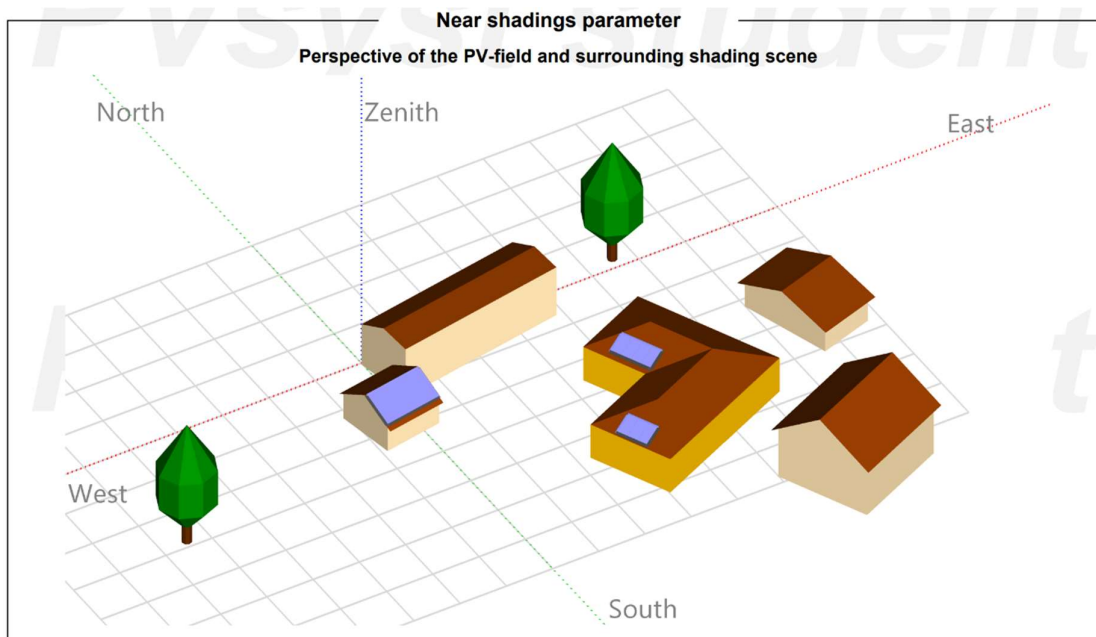
V této části diplomové práce budou znázorněny především grafické výsledky ze simulace navržené FVE ze softwaru PVsyst, tedy hlavně grafy a tabulky. Výsledky týkající se energetických záležitostí byly již představeny v předchozích podkapitolách při samotném návrhu FVE (viz. Tabulka 4.1). To samé platí pro ekonomické hledisko včetně návratnosti. Dokument s kompletními výsledky simulace FV systému s akumulací na ohřev TUV ve dvou verzích, bez dotace a s dotací, je umístěn v externích přílohách.

Ještě před vložení výsledků simulace z PVsyst bych chtěl zmínit, jak vypadá teoretický průběh výroby navržené FVE vzhledem k zátěžovému profilu. Tento průběh je znázorněn na obrázku 4.3. Z obrázku vidíme jednotlivé umístění FV modulů na danou střechu v modelovém místě, tedy umístění 9 FV modulů o celkovém výkonu 4725 Wp na střechu garáže a 7 FV modulů o celkovém výkonu 3675 Wp na západní střechu domu. Z grafu můžeme také vyčíst, že i když je celkový instalovaný výkon FVE 8,4 kWp, tak maximální výkon, který je dán součtem jednotlivých stringů s danou orientací a sklonem FV modulů se nachází okolo hodnoty 8,0 kWp. To také znamená, že navržený výstupní výkon střídače 8,0 kW je adekvátní k navrženému výkonu FVE. Z porovnání průběhů můžeme také vyčíst, že průběh výroby FVE pokrývá hlavní spotřebu modelového místa. Tento průběh je pouze teoretický za předpokladu hezkého slunečního dne bez mraků, v praxi bude výsledný výkon FVE vždy ovlivněn klimatickými podmínkami v daný den.



Obrázek 4.3: Porovnání teoretického průběhu výroby navržené FVE se zátěžovým profilem

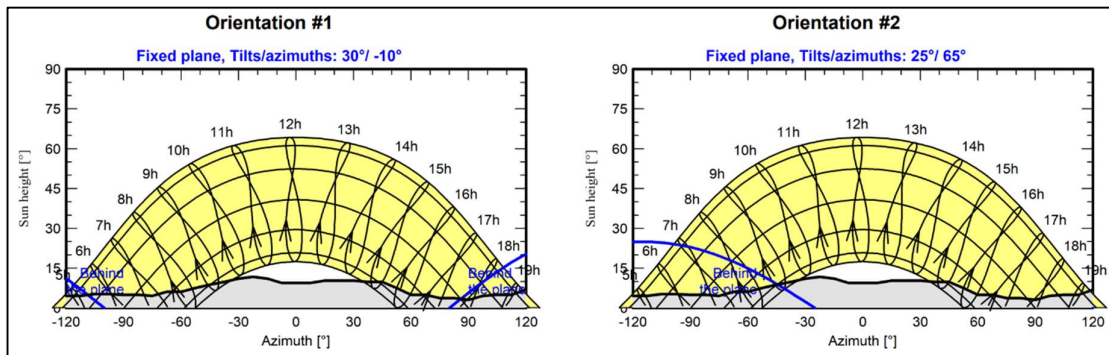
V programu PVsyst byl vytvořen 3D model všech objektů v modelovém místě. Výsledek 3D modelace je znázorněn na obrázku 4.4, namodelován byl i sousední dům a okolní stromy pro přesnější výsledky simulace. Tyto objekty ovlivňují zastínění jednotlivých FV modulů. Ty jsou také na obrázku zobrazeny a jsou umístěny v daném počtu na dané střechy dle návrhu FVE. Z tohoto obrázku můžeme také vidět, že všechny FV moduly se rozměrově vejdou na dané plochy střech.



Obrázek 4.4: 3D model modelového místa v PVsyst včetně umístění FV modulů

FV systém tedy obsahuje 2 stringy. První string s devíti FV moduly je umístěn na střeše garáže. Napětí tohoto stringu je 360,54 V při standardních testovacích podmínkách. Pokud se teplota FV článků zvýší na hodnotu 50 °C, bude napětí celého stringu 322 V. To představuje pracovní podmínky během letního období. Při horkém dni může teplota FV článků stoupnout až k hodnotě 65 °C a vlivem této teploty napětí FV modulů a celého FV pole ještě více poklesne. Naopak je to přes zimní období, kde se napětí FV modulu při poklesu teploty zvyšuje. Druhý string se sedmi FV moduly je umístěn na dvou západních plochách střechy domu, kde jsou rozděleny v počtu čtyřech a třech kusů. Tento string má napětí 280,42 V při standardních testovacích podmínkách. Při provozních podmínkách pro teplotu FV článků 50 °C má tento string napětí 251 V. Proud tekoucí oběma stringy při STC je 13,11 A, při zvýšení teploty je proud téměř totožný kvůli nízkému teplotnímu koeficientu.

Pro další zpřesnění simulace byl naimportován horizont v modelovém místě pomocí PVGIS 5.2, tento horizont je zobrazen na obrázku 4.5 pro obě orientace FV polí. Z obrázku můžeme vidět, že horizont výrazně ovlivňuje dobu slunečního svitu na FV moduly, a to především přes zimní období. Zimní období je zobrazeno nejnižší čarou, naopak letní období je zobrazeno nejvyšší čarou žlutého objektu, který představuje pohyb Slunce po obloze. Zároveň vidíme, že výroba elektrické energie pomocí západní orientace FV modulů je omezená právě orientací. To znamená, že FV moduly nejsou schopni v ranních hodinách vyrábět elektrickou energii.



Obrázek 4.5: Horizont v modelovém místě pro obě orientace FV modulů

Jedním z nejdůležitějších výstupů ze simulace FVE je výroba elektrické energie a její spotřeba. Můžeme se podívat na roční energetické hodnoty nebo na výrobu elektrické energie fotovoltaickou elektrárnou a její spotřebu za jednotlivé měsíce. Roční energetické hodnoty již byly představeny pro dané varianty FV systému, nyní se detailněji podíváme na jednotlivé měsíční energetické hodnoty pro finální konfiguraci FVE.

Budou nás zajímat měsíční hodnoty vyrobené elektrické energie, spotřebované elektrické energie v objektu, dále dodaná energie do distribuční sítě a odebraná energie z této sítě. Tyto hodnoty jsou uvedeny v následující tabulce 4.5, tyto hodnoty nerespektují akumulaci přebytečné energie na ohřev TUV. V tabulce je také uvedena efektivní hodnota ozáření FV modulů pro jednotlivý měsíc, která respektuje skutečné podmínky včetně spektra AM, zastínění FV modulů, ale také úhel dopadu světla apod. Hodnota tohoto záření zahrnuje přímé sluneční záření i difúzní sluneční záření. Hodnoty měsíčních dat jsou v PVsyst zaokrouhlovány na jedno desetinné místo, proto jejich výsledný součet za celý rok není přesným součtem jednotlivých měsíčních hodnot.

Tabulka 4.6: Výsledky energetických hodnot z PVsyst pro jednotlivý měsíc

<b>Měsíc</b>	<b>GlobEff<sup>23</sup> (kWh/m<sup>2</sup>)</b>	<b>EArray<sup>24</sup> (kWh)</b>	<b>E_Solar<sup>25</sup> (kWh)</b>	<b>E_Grid<sup>26</sup> (kWh)</b>	<b>EFrGrid<sup>27</sup> (kWh)</b>
Leden	22,6	185	137,1	40,8	668,4
Únor	56,9	476	302,2	162,3	425,4
Březen	98,4	813	442,3	353,6	363,2
Duben	141,2	1142	537,5	582,3	242,1
Květen	131,5	1027	484,1	521,3	321,5
Červen	151,1	1177	542,8	610,3	236,7
Červenec	153,1	1190	549,0	617,4	256,6
Srpen	139,1	1096	551,8	521,9	253,7
Září	104,9	835	429,6	388,4	350,0
Říjen	69,4	565	338,4	213,8	467,2
Listopad	30,0	246	168,5	69,6	611,1
Prosinec	17,1	138	98,2	33,6	707,4
Roční suma	1115,3	8891	4581,6	4115,2	4903,3

Z uvedených hodnot vidíme, že největší výroba elektrické energie z FVE je v červenci, naopak nejhorší je v lednu. To asi nikoho nepřekvapí. Zároveň můžeme říct, že efektivní využití FVE je od března do září, kde je spotřeba elektrické energie přímo z FVE vyšší než spotřeba elektrické energie z distribuční sítě. Naopak v dalších pěti měsících od října do února je spotřeba elektrické energie z distribuční sítě vyšší než spotřeba přímo z FVE. V únoru a v říjnu je využití elektrické energie z FVE jen o něco málo nižší než odběr energie ze sítě. V ostatních měsících je tento rozdíl mnohem výraznější. Z uvedených hodnot si můžeme také všimnout, že výroba elektrické energie z FVE je v dubnu vyšší než v květnu. To naznačuje to, že v dubnu je o něco lepší počasí s více slunečnými dny, to potvrzují i hodnoty globálního ozáření FV modulů uvedené v prvním sloupci tabulky. Zároveň to může být způsobeno i tím, že jsou menší ztráty na FV modulech vlivem nižší teploty, která způsobí menší zahřívání FV modulů, respektive jejich chlazení.

<sup>23</sup> Effective Global irradiation, correction for IAM and shadings (Efektivní globální ozáření FV modulů s korekcí na AM a zastínění)

<sup>24</sup> Effective energy at output of the array (Efektivní hodnota vyrobené energie na výstupu z FV pole)

<sup>25</sup> Energy from the sun (Energie ze Slunce neboli spotřebovaná energie ze slunce)

<sup>26</sup> Energy injected into grid (Energie dodávaná do distribuční sítě)

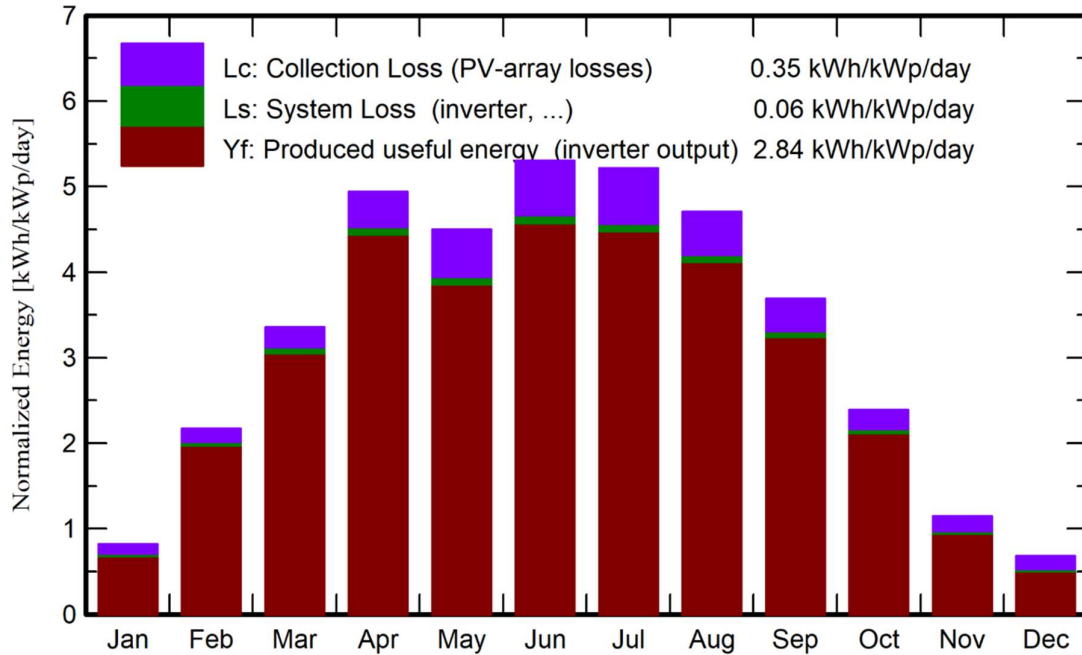
<sup>27</sup> Energy from the grid (Energie odebíraná z distribuční sítě)

Také si můžeme všimnout, že přes letní měsíce červen a červenec je větší dodávka elektrické energie z FVE do distribuční sítě než do samotné spotřeby objektu. Kvůli tomu byl do FV systému zařazen regulátor pro akumulaci přebytečné energie dodávané do distribuční sítě na ohřev TUV. Tento systém nejde nijak zadat do softwaru PVsyst, proto jsou hodnoty v tabulce uvedeny bez vlivu tohoto systému. Při použití této akumulace přebytečné energie by se spotřeba elektrické energie z FVE zvýšila zhruba o 243 kWh v červnu a v červenci a o 122 kWh v květnu a v srpnu. Zároveň by se o tyto hodnoty nížila dodávka energie do distribuční sítě. Hodnoty 243 kWh a 122 kWh jsou vypočteny z předpokladu využití systému pro akumulaci přebytečné energie na ohřev vody, které bylo předpokládáno na tři měsíce v roce. Dříve bylo už vypočteno, že by pomocí této akumulace bylo využito navíc 730 kWh ročně. Tuto hodnotu jsem tedy vydělil třemi a zaokrouhlil, z toho mi vyšla hodnota 243 kWh pro měsíce s velkou dodávkou elektrické energie do sítě. Zbýlých 244 kWh jsem vydělil dvěma pro využití této akumulace v dalších dvou měsících, v květnu a v srpnu. Jde pouze o teoretický předpoklad využití této akumulace na ohřev TUV.

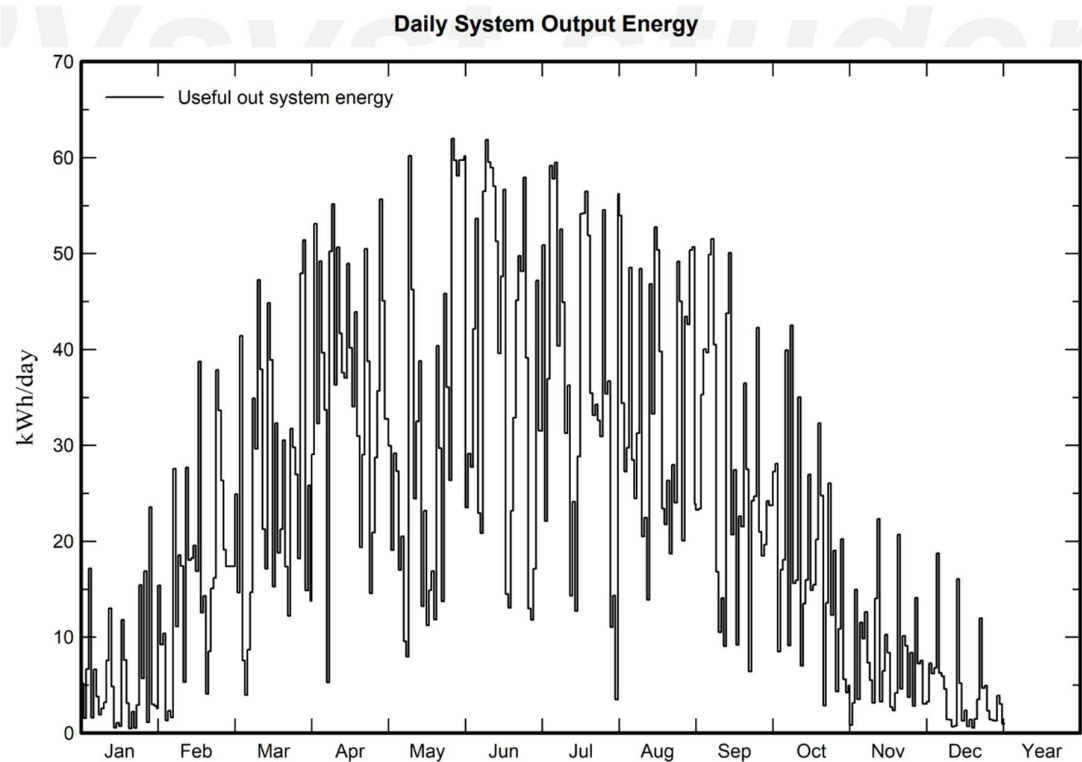
Výrobu elektrické energie FVE za jednotlivé měsíce včetně uvedených ztrát můžeme vidět na obrázku 4.6. Tento obrázek ukazuje vyrobenou energii na výstupu střídače, ztráty střídače a ztráty FV pole. Všechny tyto hodnoty energií jsou vztažené k celkovému výkonu FVE a na jeden den, jednotkou je tedy kWh/kWp/den. Z obrázku můžeme vyčíst podobné poznatky, které byly popsány výše. Zároveň ale vidíme, že ztráty jsou v létě vyšší než v zimě. Jedná se především o ztráty na FV modulech, které vznikají vlivem vyšší teploty v létě a vlivem delší doby výroby elektrické energie. Naopak v zimním období je málo slunečních dní a zároveň jsou FV moduly chlazené okolní teplotou, takže vznikající ztráty jsou výrazně menší. Ztráty střídače souvisí pouze s jeho dobou provozu. Tedy s rostoucí dobou provozu ztráty také rostou a jsou dány účinností střídače. Nejvýznamnější ztráty celého FV systému vznikají na FV modulech. Jde o ztráty vlivem teploty, velikosti ozáření nebo zastínění. Mezi další významné ztráty můžeme zahrnout ztráty střídače nebo ohmické ztráty na vedeních při přenosu elektrické energie.

Na dalším obrázku 4.7 je znázorněna denní výroba FVE v průběhu roku. Je vidět, že FVE nevyrábí přes celé letní období stejné množství elektrické energie, ale její výroba je silně závislá na počasí. Proto i v létě jsou dny, kdy FVE vyrobí méně elektrické energie, než by vyrobila v zimě při slunečném dni. Pokud bychom k tomuto průběhu přidali spojnicí trendu, vyšel by průběh kopírující trend, který je zobrazený na obrázku 4.6.





Obrázek 4.6: Ztráty a výroba FVE za jednotlivé měsíce



Obrázek 4.7: Výroba FVE za den v průběhu roku

## 5 Připojitelnost do distribuční sítě

Modelové místo se nachází na distribučním území EG.D. Připojení FVE do distribuční sítě se označuje jako připojení mikrozdroje. Mikrozdroj je zdroj elektrické energie s jmenovitým střídavým fázovým proudem do velikosti 16 A na fázi včetně a celkovým maximálním instalovaným výkonem do 10 kW včetně, který je určen pro paralelní provoz s distribuční soustavou nízkého napětí. Mikrozdroj může být připojen do distribuční sítě dvěma způsoby. Jedním z nich je připojení s přetoky do distribuční soustavy, tedy s rezervovaným výkonem. Druhým z nich je bez přetoků do distribuční sítě, FVE je následně využívána pouze pro vlastní spotřebu objektu. Pro připojení mikrozdroje do distribuční soustavy je nutno splnit připojovací podmínky daného distributora distribuční sítě. Aktuální připojovací podmínky do distribuční soustavy jsou vždy uvedeny na webových stránkách daného distributora. [33]

V tomto odstavci je uvedeno několik požadavků z aktuálních připojovacích podmínek do distribuční sítě pro území EG.D., platné od 1.1.2024, které se týkají připojení fotovoltaické elektrárny. Jednou z hlavních podmínek je osazení ovládacího relé a vypínače instalace do elektroměrového rozvaděče, jehož zhotovení musí být dle platných připojovacích podmínek. Také je nutno označit elektroměrový rozvaděč štítkem dle normy ČSN 33 2000-7-712. Fotovoltaická elektrárna také musí být schopna řízení účinníku a jalového výkonu. Řízení účinníku je vyžadováno v rozsahu 0,9 kapacitní až 0,9 induktivní v souladu s pracovními diagramy. FVE musí v tomto rozmezí splňovat  $Q(U)$  charakteristiku, danou distributorem. Zároveň je požadavek na úpravu činného výkonu v závislosti na frekvenci nebo na napětí sítě, tedy FVE musí splňovat  $P(f)$  nebo  $P(U)$  charakteristiku danou distributorem. Všechny tyto charakteristiky jsou uvedeny v příloze č. 4 vztahující se k PPDS, tato příloha je umístěna na webových stránkách distributora. [33]

### 5.1 Konkrétní schéma sítě a výpočet připojitelnosti

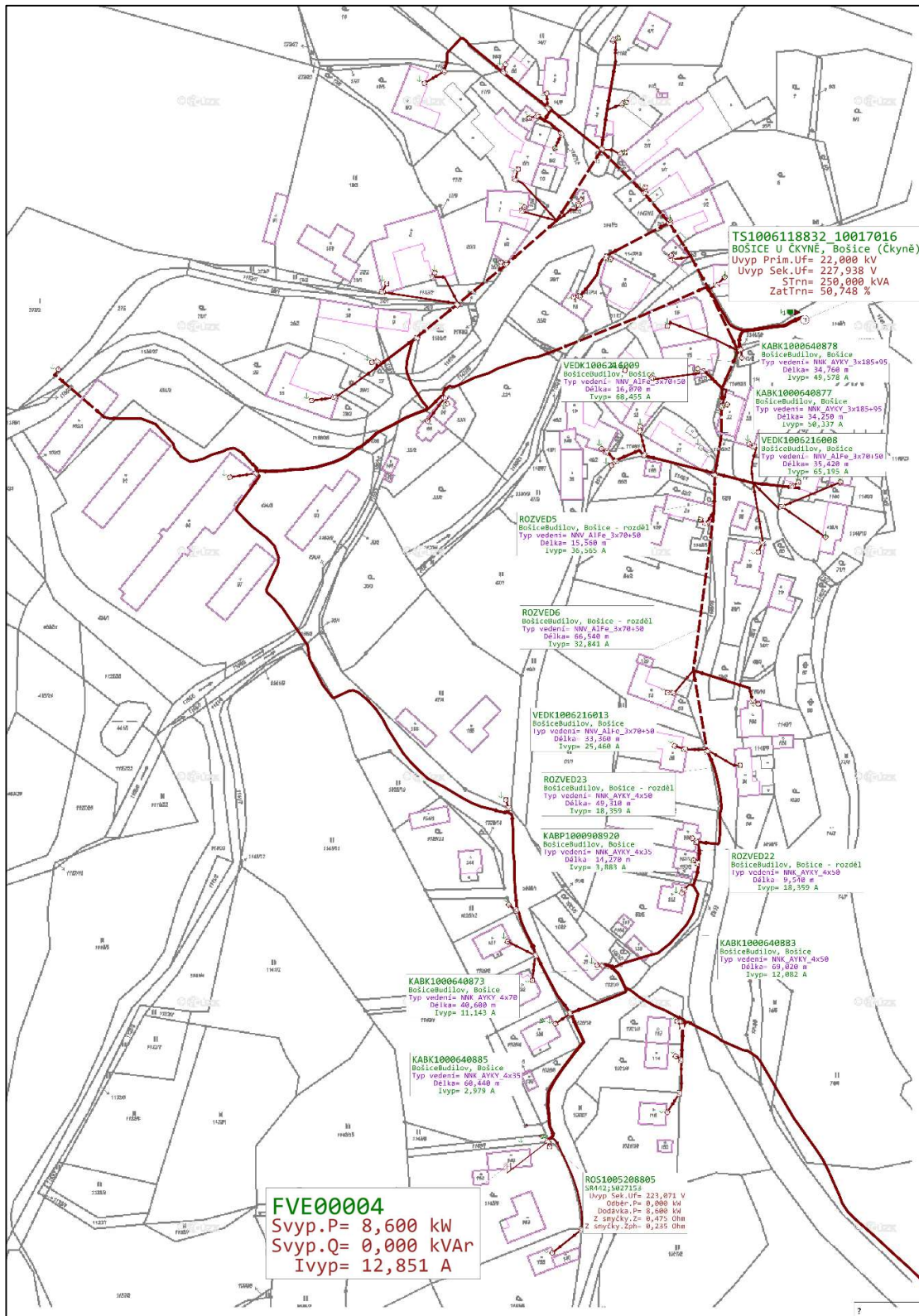
Jak už bylo zmíněno, modelové místo se nachází na území EG.D. v obci Bošice. Konkrétní schéma distribuční sítě je zobrazeno na obrázku 5.1. Toto schéma bylo získáno ze softwaru Grizzly přímo z EG.D. Toto schéma distribuční sítě je umístěno v externích přílohách. Čárkovanou čarou jsou označeny venkovní vedení, plnou čarou jsou označeny kabelová vedení uložená v zemi. Oblast je napájena z transformátoru 22/0,4 kV o jmenovitém výkonu 250 kVA, který je umístěn v pravém horním rohu obrázku. Transformátor je aktuálně zatížen

na 50,75 % svého jmenovitého výkonu. Distribuční síť je provozovaná jako paprsková. Modelové místo je umístěné téměř na konci jedné z větví vedení, modelové místo můžeme najít v dolní části obrázku. Daná větev vedení vede od modelového místa téměř přes celou vesnici s relativně velkým počtem připojených odběrných míst až k distribučnímu transformátoru.

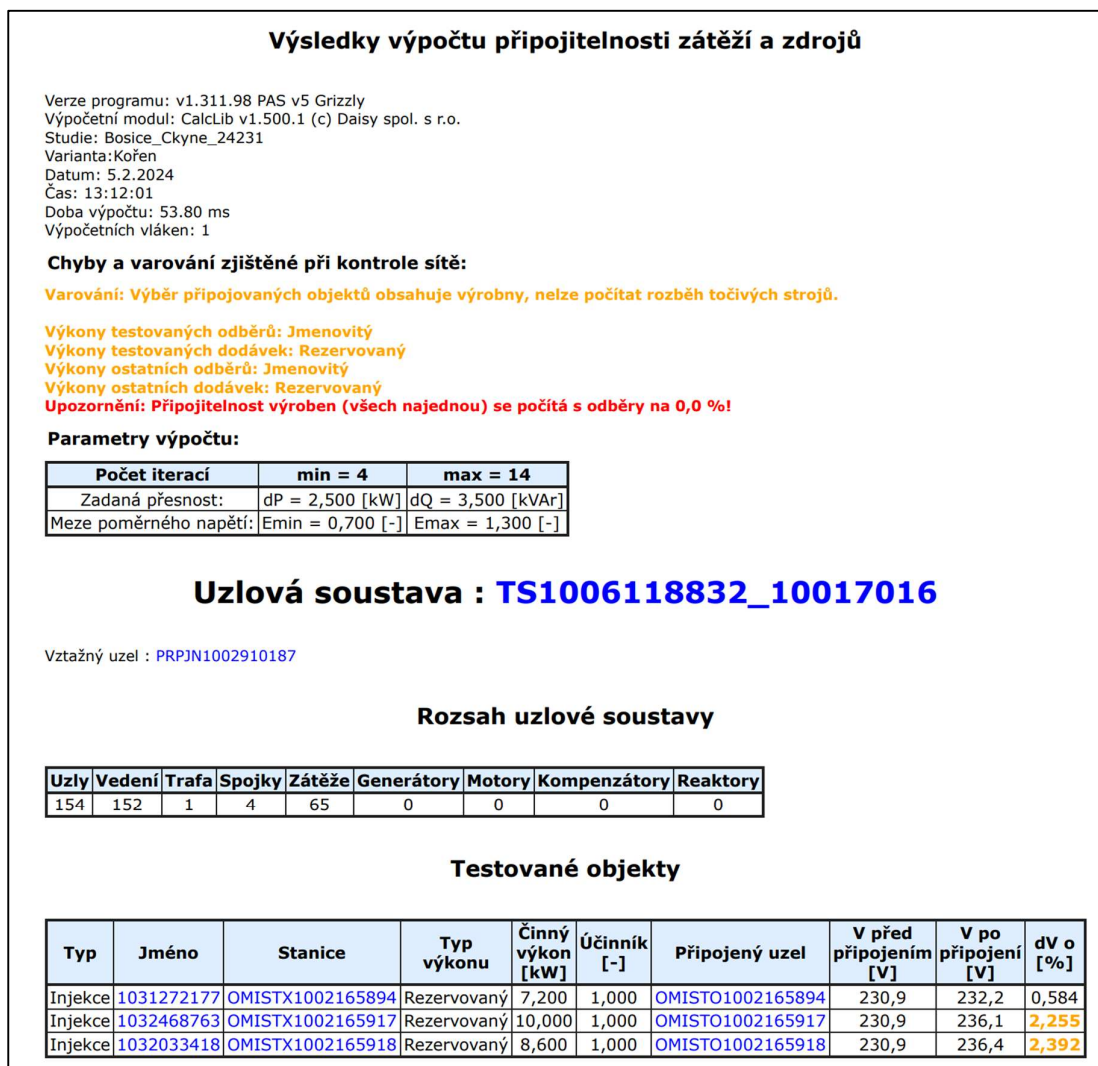
Důležitý parametr pro připojení FVE je tzv. rezervovaný výkon. To je výkon, který chceme alokovat v síti pro připojení FVE o dané velikosti. Tento výkon ale nesmí ovlivnit chod a stabilitu sítě. Tedy v distribuční síti na daném místě připojení musí mít rezerva v kapacitě sítě větší, než je rezervovaný výkon potřebný pro připojení FVE. Tato kapacita sítě je dána transformátorem pro danou oblast, poté topologií zapojení sítě a také použitými kabely s určitými průřezy a jejich zatížením. Pro připojení FVE daného výkonu nesmí být změna napětí (pokles či nárůst) větší než 3 % z původní napěťové hodnoty. Výpočet se provádí v softwaru Grizzly, který počítá i se všemi zdroji v dané oblasti připojené na daný distribuční transformátor.

V oblasti modelového místa jsou tři zdroje elektrické energie. Jedná se o tři fotovoltaické elektrárny, přičemž jedna z nich je fotovoltaická elektrárna v modelovém místě. Pro výpočet připojitelnosti zátěží a zdrojů byl použit rezervovaný výkon o hodnotě 8,6 kW, kde tato hodnota byla pouze počátečním předpokladem. Finální navržená FVE má výkon 8,4 kWp (rovná se rezervovanému výkonu), tedy nižší výkon, než byl použit pro výpočet připojitelnosti. Výsledek výpočtu připojitelnosti z programu Grizzly je poté zobrazen na obrázku 5.2. Z tohoto obrázku vidíme, že výpočet připojitelnosti proběhl pro jeden transformátor a 65 odběrných míst. To znamená, že výpočet připojitelnosti proběhl pro celou oblast připojenou na distribuční transformátor, tedy pro všechny odbočky a větve vinutí. Kompletní výsledek výpočtu připojitelnosti je umístěn v externích přílohách.

Ve spodní tabulce na obrázku 5.2. v poslední řádce vidíme uvedenou navrhovanou FVE v modelovém místě s rezervovaným výkonem 8,6 kW. Napětí v tomto uzlu sítě bylo před připojením všech zdrojů 230,9 V. Po připojení všech zdrojů včetně FVE v modelovém místě se napětí v tomto uzlu zvýšilo na hodnotu 236,4 V. Změna napětí je tedy o 2,392 %, tato hodnota je menší než 3 %. Tudíž navrhovaná FVE s rezervovaným výkonem 8,4 kW by byla do distribuční sítě bez problémů připojena, protože výpočet připojitelnosti vyšel i pro FVE s rezervovaným výkonem 8,6 kW.



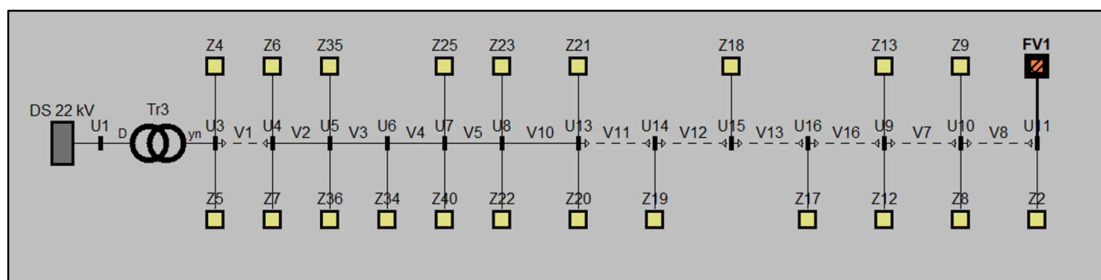
Obrázek 5.1: Reálné schéma distribuční sítě v modelovém místě



Obrázek 5.2: Výsledek výpočtu připojitelnosti z programu Grizzly

Výpočet připojitelnosti navržené fotovoltaické elektrárny byl následně ještě proveden v softwaru DNcalc. Tento výpočet byl proveden pro další kontrolu připojitelnosti FVE a pro porovnání výsledků z přechozího výpočtu připojitelnosti ze softwaru Grizzly. Ze získané reálné sítě ze softwaru Grizzly byla následně do programu DNcalc namodelována pouze větve sítě od distribučního transformátoru až po modelové místo včetně připojených odběrných míst. Jednotlivé kabely vedení byly stanoveny přesně podle schématu sítě získané z EG.D. včetně jejich délky tak, aby namodelovaná síť odpovídala reálné síti. Distribuční transformátor byl zvolen podle reálného použitého transformátoru o jmenovitém výkonu 250 kVA. Dílčí odběrná místa byla modelována s nejběžnější hodnotou hlavního jističe 3x25 A, tedy s odběrem činného i jalového výkonu 10 kW s účinníkem rovným jedné. Namodelovaná síť v softwaru DNcalc je zobrazena na obrázku 5.3. Na poslední uzel větve

$U_{11}$  je připojeno odběrné místo a navržená fotovoltaická elektrárna o výkonu 8,4 kWp. Ostatní zdroje nebyly modelovány, jelikož jsem neměl informace, v jakém uzlu sítě jsou napojeny. Navíc připojení těchto zdrojů zlepšuje napěťové podmínky v síti. Následně byl spuštěn výpočet připojitelnosti navržené FVE.



Obrázek 5.3: Namodelovaná větev sítě v softwaru DNcalc dle reálné sítě

Výsledky výpočtu připojitelnosti jsou uvedeny v následující tabulce 5.1. Z výsledků vidíme, že všechny hodnoty změn napětí v jednotlivých uzlech sítě a na jednotlivé fázi nepřevýšili hodnotu 3 %. Zároveň vidíme, že všechny hodnoty jsou kladné, tudíž došlo k navýšení napětí v jednotlivých uzlech sítě po připojení FVE.

Tabulka 5.1: Výsledky výpočtu připojitelnosti ze softwaru DNcalc

Uzel sítě	$\Delta U_a$ (%)	$\Delta U_b$ (%)	$\Delta U_c$ (%)
$U_1$	0,032	0,032	0,032
$U_3$	0,167	0,167	0,167
$U_4$	0,228	0,228	0,228
$U_5$	0,313	0,313	0,313
$U_6$	0,499	0,499	0,499
$U_7$	0,579	0,579	0,579
$U_8$	0,905	0,905	0,905
$U_9$	1,879	1,879	1,879
$U_{10}$	2,023	2,023	2,023
$U_{11}$	2,405	2,405	2,405
$U_{13}$	1,063	1,063	1,063
$U_{14}$	1,342	1,342	1,342
$U_{15}$	1,395	1,395	1,395
$U_{16}$	1,507	1,507	1,507

Z hlediska připojitelnosti nás zajímá především uzel  $U_{11}$ , do kterého je připojeno odběrné místo s navrženou fotovoltaickou elektrárnou o výkonu 8,4 kWp. Vidíme, že v tomto uzlu je změna napětí nejvýraznější, ale stále je tato hodnota pod hodnotou 3 %. Tudíž by bylo možné tuto FVE s daným výkonem do sítě připojit. Tento výsledek se shoduje s výsledkem výpočtu připojitelnosti ze softwaru Grizzly.

Změna napětí v uzlu sítě, kde je připojeno modelové místo a navrhovaná FVE, ze softwaru Grizzly je 2,392 %, ze softwaru DNcalc je změna napětí ve stejném uzlu sítě 2,405 %. Tyto hodnoty jsou si velmi blízké, jejich rozdíl byl nejspíš způsoben rozdílným nastavením v jednotlivých softwarech nebo některým zjednodušením. Rozdíl tedy mohl nastat tím, že software Grizzly počítá i s ostatními zdroji v síti, kterými jsou další dvě fotovoltaické elektrárny a jedna z nich je nejspíš napojena do větve vinutí s připojeným modelovým místem. V softwaru DNcalc bylo počítáno pouze s navrhovanou fotovoltaickou elektrárnou. Dále mohl být rozdíl hodnot způsoben tím, že software Grizzly počítá přímo s reálnými hodnotami hlavních jističů odběrných míst, zatímco toto bylo v softwaru DNcalc zjednodušeno. Další rozdíl ve výsledné hodnotě změny napětí mohl nastat nastavením rozdílného výkonu navržené FVE v jednotlivých softwarech. V softwaru Grizzly byl použit výkon FVE o hodnotě 8,6 kWp, zatímco pro DNcalc byl použit výkon FVE o hodnotě 8,4 kWp, který odpovídá přesnému návrhu FVE.

## 6 Technické provedení FVE

V této části práce bude zhodnoceno technické provedení navržené FVE. Toto provedení bude probráno z hlediska elektrické bezpečnosti, z hlediska ochrany před úderem blesku a z hlediska požární bezpečnosti. Nejdříve budou popsány všeobecné postupy a zásady, které respektují příslušné normy. Následně bude popsáno přímo technické řešení navrhované FVE v modelovém místě.

### 6.1 Zásady elektrické bezpečnosti

Všeobecně musí být ochrana před úrazem elektrickým proudem provedena dle ČSN 33 2000-4-41 ed. 3, ČSN 33 2000-5-54 ed.3 a ČSN EN 61140 ed. 3 v platném znění. Dle ČSN 33 2000-7-712 ed. 2, čl. 712.410.101 musí být elektrické zařízení na DC straně považováno za zařízení pod napětím i v případě, když je AC strana odpojena od sítě, anebo když je odpojen měnič.

Pro instalaci fotovoltaické elektrárny musí být použity měděné kabely s izolací zabraňující podélnému šíření plamene a odolné proti povětrnostním podmínkám. Kabeláž musí být provedena dle ČSN 33 2000-5-52 ed. 2 v platném znění. Délka kabelů by měla být, pokud možno co nejkratší. Kabely by měly být řádně označeny. Všechny rozvaděče a ostatní elektrická zařízení musí být adekvátně uzemněny. Všechny rozvaděče musí být označeny příslušnými bezpečnostními tabulkami „Zařízení pod napětím i při vypnutém hlavním vypínači“, „Pozor elektrické zařízení“ a „Pozor zpětný proud“. Dále dle ČSN 33 2000-7-712 ed. 2, čl. 712.514.101 musí být pro zajištění bezpečnosti osob dána výstraha označující přítomnost fotovoltaické instalace pomocí štítku nalepeného na elektroměrovém rozvaděči.

Na střeše garáže je umístěno 9 FV modulů spojených do jednoho stringu. Vedení mezi tímto FV polem a rozvaděčem RDAC (technologický rozvaděč) bude vedeno v plastové UV odolné chrániče po stěně garáže, poté v plastové chrániče uložené v zemi až k rodinnému domu, kde bude chránička provlečena průrazem skrz zeď do technické místnosti. Zde bude tento string doveden v plastové liště do rozvaděče RDAC. Délka této kabelové trasy je 20 metrů. Na západní straně střechy domu bude umístěno 7 FV modulů spojených do druhého stringu. Kabelová trasa mezi FV moduly na různých plochách střechy bude vedena v plastové UV odolné chrániče skrz větrací tašky a přes půdu domu. Od čtyřech FV modulů

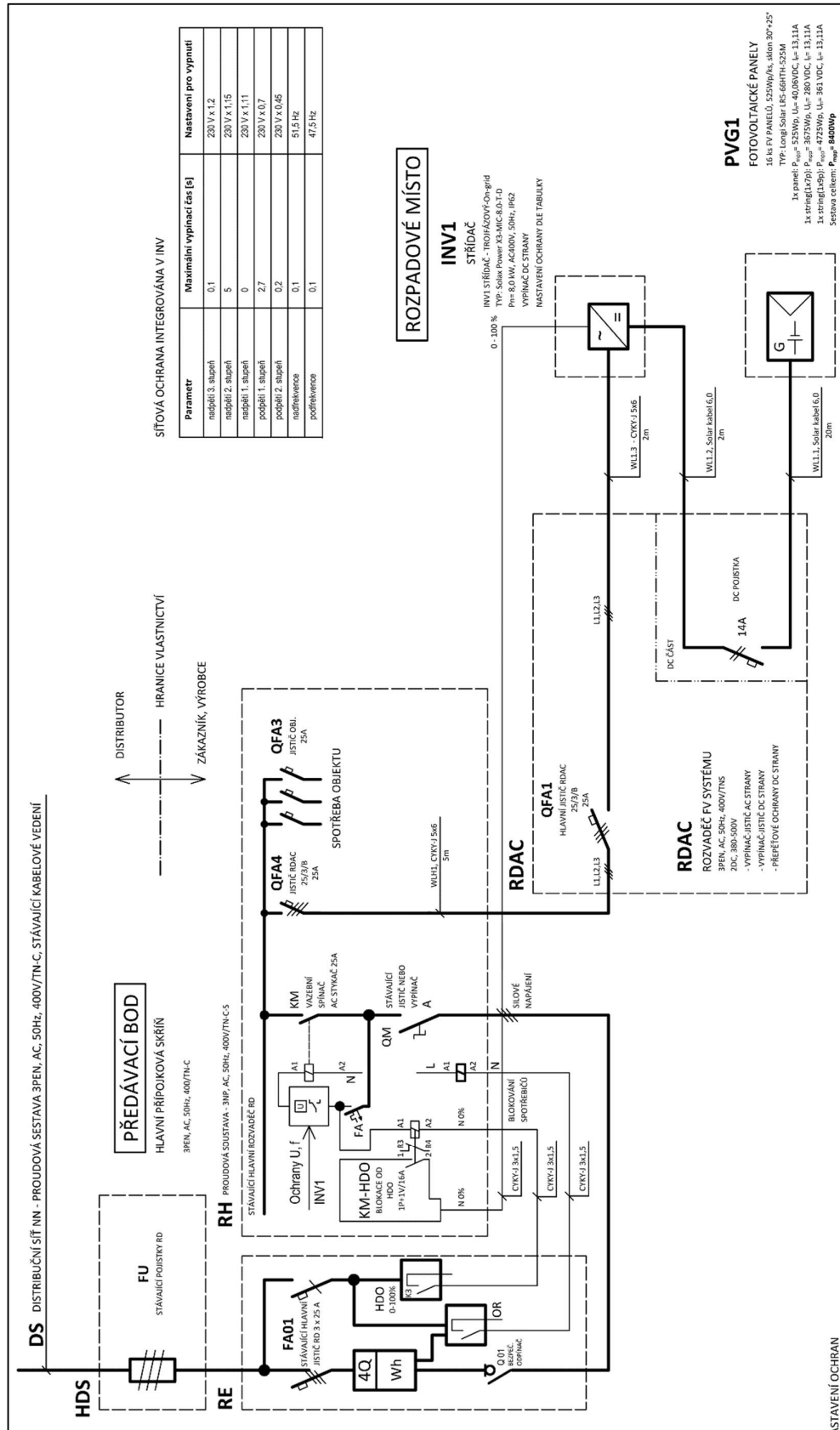


bude následně kabelová trasa vedena opět skrz větrací tašku na půdu. Zde bude plastová chránička provlečena průrazem skrz sádkartonový strop do technické místnosti a poté bude kabelová trasa vedena v plastové liště do rozvaděče RDAC. Délka této trasy je 10 metrů k prvnímu FV poli se čtyřmi FV moduly a následně dalších 10 metrů k druhému FV poli se třemi FV moduly.

K propojení FV modulů jsou použity jednožilové solární kabely H1Z2Z2-K o průřezu měděného jádra 6 mm<sup>2</sup> se solárními konektory MC4 na koncích jednotlivých kabelů. Kladný pól je označen červenou barvou kabelu, záporný pól je označen černou barvou kabelu. Kabely budou vedeny co nejbližší k sobě v jedné chráničce. DC kabely od jednotlivých stringů jsou nejdříve vedeny přes rozvaděč RDAC kvůli DC ochraně a až poté jsou vedeny do střídače.

Střídač a technologický rozvaděč RDAC jsou umístěné v technické místnosti v rodinném domě. V technické místnosti je také umístěn hlavní domovní rozvaděč RH. Rozvaděč RDAC obsahuje odpínače fotovoltaických kabelů na stejnosměrné straně a hlavní jistič FVE na střídavé straně. Součástí rozvaděče budou i přepěťové ochrany DC a AC strany a regulátor pro akumulaci přebytečné energie na ohřev TUV včetně SSR. Do tohoto rozvaděče je dále připojen střídač silovým kabelem CYKY-J 5x6 o délce dvou metrů. Technologický rozvaděč RDAC je následně propojen s hlavním domovním rozvaděčem RH silovým kabelem CYKY-J 5x6 o délce 5 metrů a kabelem CYKY-J 3x1,5 pro regulaci výkonu FVE pomocí HDO signálu o stejné délce. Rozvaděč RH je napojen do distribuční sítě přes elektroměrový rozvaděč RE, tedy přes čtyřkvadrantní elektroměr, přes odpínač instalace a následně přes pojistky umístěné v pojistkové skříni HDS. Všechny tyto výše popsané záležitosti jsou uvedené na obrázku 6.1, na kterém je zobrazena část jednopólového schématu navrhované FVE. Kompletní jednopólové schéma navržené fotovoltaické elektrárny je umístěno v externích přílohách. V jednopólovém schématu není zohledněn systém pro akumulaci přebytečné energie na ohřev TUV.

Střídač je vybaven síťovými ochranami, které působí na rozpadové místo integrované uvnitř střídače, které FV výrobu automaticky odpojí od sítě. Dále je střídač připojen na vazební spínač, který odpojí výrobu včetně ostrovního provozu. Další možností manuálního odpojení výroby je vypnutí hlavního jističe v elektroměrovém rozvaděči nebo pomocí hlavního vypínače uvnitř rozvaděče FVE (RDAC).



Obrázek 6.1: Jednopolového schéma navržené FVE

## 6.2 Ochrana před úderem blesku

Předpokladem bezpečné a spolehlivé funkce FVE je i ochrana před úderem blesku, který může způsobit požár či poškození elektroinstalace nebo elektronických zařízení. Pro každou instalovanou FVE by měl tedy být zpracován projekt hromosvodu podle normy ČSN EN 62305. V této normě je primárně řešeno oddálení hromosvodu, tedy výpočet dostatečné izolační vzdálenosti mezi hromosvodem a FV polem a zda je hromosvod na budově nainstalovaný. Dostatečná izolační vzdálenost se označuje písmenem  $s$  a definuje vzdálenost mezi hromosvodem včetně jeho součástí a FV polem včetně konstrukce. Přeskoková vzdálenost je dle normy definována vztahem:

$$s = \frac{k_i \cdot k_c \cdot l}{k_m}, \quad (6.1)$$

kde  $s$  je izolační vzdálenost v metrech,  $k_i$  je koeficient třídy ochrany objektu (pro rodinné domy je  $k_i = 0,04$ ),  $k_c$  je koeficient počtu svodů (pro jeden svod je  $k_c = 1$ , pro dva svody je  $k_c = 0,66$ , pro tři a více svodů se rovná  $k_c = 0,44$ ),  $k_m$  je koeficient izolace mezi hromosvodem a FV komponentou (pro vzduch je  $k_m = 1$ ) a  $l$  je délka svodu hromosvodu od bodu výpočtu až k zemi. [34][35]

### 6.2.1 Návrh ochrany před úderem blesku

Návrh ochrany před úderem blesku se liší podle různých kritérií. Zejména, zda je na střeše již instalovaná jímací soustava nebo právě na velikosti izolační vzdálenosti vzhledem k reálné vzdálenosti nainstalovaného FV pole a jímací soustavy. Proto je návrh ochrany před úderem blesku nutno rozlišovat pro tři případy, kterými jsou:

- budova nemá zřízený hromosvod
- budova má zřízený hromosvod a je dodržena dostatečná izolační vzdálenost
- budova má zřízený hromosvod a není dodržena dostatečná izolační vzdálenost

V prvním případě, kdy není na budově instalovaný hromosvod, je nutné zajistit vnitřní ochranu před úderem blesku, která spočívá v instalaci svodičů přepětí, případně svodičů bleskového proudu. To znamená osazení DC svodičů přepětí pro ochranu DC strany střídače a AC svodičů přepětí pro ochranu AC strany střídače a napájecí distribuční sítě. Na DC straně by měla být instalována přepět'ová ochrana Typ 1. Ochrana před úderem blesku by měla ještě obsahovat pospojení FV modulů s konstrukcí a s hlavní ochranou přípojnicí

lankovým vodičem CYA H07V-K o průřezu  $16 \text{ mm}^2$ . V tomto případě ochrany nejsou FV moduly chráněny před přímým úderem blesku. [34][35]

Druhá varianta se zřízeným hromosvodem na budově a s dodrženu dostatečnou izolační vzdáleností je tou nejlepší ochranou. Zde se jedná jak o vnitřní ochranu, tak i o vnější ochranu před úderem blesku. Tato ochrana je provedena stejným způsobem, jak v předešlém případě pomocí svodičů přepětí na DC i AC straně, ale dále je doplněna ochranou před přímým úderem blesku. Tuto ochranu zajišťuje instalovaná jímací soustava. V tomto případě nesmí FV moduly a jejich konstrukce tvořit část jímací soustavy, tedy musí být v tzv. ochranném prostoru jímací soustavy. Zároveň musí být dodržena izolační vzdálenost s. Krytina střechy nesmí být vodivá. Pro tuto variantu nehrozí přímý zásah bleskem, fotovoltaická elektrárna je tedy chráněna. [34][35]

V posledním případě, kdy je zřízen hromosvod na budově, ale není dodržena izolační vzdálenost s nebo pokud je krytina střechy vodivá, je potřeba provést potencionální vyrovnání. To spočívá v pospojení FV modulů a jejich konstrukce s jímací soustavou na co nejvíce místech hromosvodovým vodičem o minimálním průřezu  $50 \text{ mm}^2$ . Zároveň ale musíme zajistit, aby FV moduly netvořili část jímací soustavy, aby nehrozil přímý úder blesku do FV modulů. To lze dosáhnout instalací pomocných jímačů. V tomto případě jsou opět aplikovány prvky vnitřní ochrany pomocí DC a AC svodičů přepětí a dále je propojena konstrukce s FV moduly s ochranou přípojnicí pomocí vodiče CYA H07V-K o průřezu  $16 \text{ mm}^2$ . Na DC straně by měla být instalována přepěťová ochrana Typ 1. [34][35]

### **6.2.2 Realizace ochrany na objekty v modelovém místě**

V modelovém místě je třeba řešit ochranu před úderem blesku především na objektech, kde budou instalované FV moduly. Jedná se tedy o rodinný dům a garáž. Střecha domu nemá instalovanou jímací soustavu a zároveň nemá vodivou střešní krytinu. Proto bych postupoval pomocí první varianty ochrany, tedy pouze pomocí vnitřní ochrany před úderem blesku. Byly by tedy instalovány DC svodiče přepětí a AC svodiče přepětí. Také by FV moduly byly propojeny s konstrukcí, následně by celé FV pole bylo propojeno pomocí zelenožlutého vodiče CYA H07V-K o průřezu  $16 \text{ mm}^2$  s hlavní ochranou přípojnicí. V tomto případě by FV moduly na střeše rodinného domu nebyly chráněny před přímým úderem blesku.

Střecha garáže také nemá zřízený hromosvod, navíc je zde instalována vodivá (plechová) krytina. FV moduly jsou na této střeše umístěny až k jejímu okraji, proto by nemohla být dodržena ani izolační vzdálenost s. Proto bych použil třetí variantu ochrany před úderem blesku. To znamená, že by se nainstalovala nová jímací soustava, která by byla spojena s FV moduly a s jejich konstrukcí. Jímací soustava by byla nainstalována tak, aby FV moduly netvořili část jímací soustavy. Konstrukce FV modulů by byla následně propojena pomocí zelenožlutého vodiče CYA H07V-K o průřezu 16 mm<sup>2</sup> s hlavní ochranou přípojnici. Následně by byly použity DC svodiče přepětí a AC svodiče přepětí.

### 6.3 Požární bezpečnost

Pro zajištění dostatečné požární bezpečnosti je vhodné vyhodnotit jednotlivá rizika od projekce, přes instalaci, provoz a údržbu fotovoltaické elektrárny. Riziko požáru hrozí v celé instalaci, ačkoliv je větší pravděpodobnost rizika požáru na kabelových spojích nebo konektorech. Požární bezpečnost se řídí dle vyhlášky č. 23/2008 Sb. [36][37]

Pro zajištění požární bezpečnosti je vhodné oddělit obálku budovy s instalovanou FVE od vnitřních prostor vhodnou požární ucpávkou. Napětí na daném stringu je vhodné volit do hodnoty 400 V, jelikož jednotky požární ochrany jsou vybaveny technikou k zásahu na zařízení pod napětím do této hodnoty napětí. Pro tyto účely lze také použít DC odpojovače FV modulů pro rozdělení stringu na dílčí části s nižším napětím. Kabelové trasy je nutné vždy vést v plastových chráničkách nebo v kovových žlabech. Technologie FVE se umísťuje na nehořlavé materiály, které musí být třídy reakce na oheň A1/A2. [36][37]

Navržená fotovoltaická elektrárna v modelovém místě je přístupná integrovaným záchranným složkám ČR. Technologie FVE není umístěna v chráněné únikové cestě budovy, neobsahuje žádné bezpečnostní zařízení ani zařízení, které musí zůstat funkční v případě požáru. Proto není vytvořen samostatný požární úsek a celý objekt se pokládá za jeden požární úsek. Výrobna nezvyšuje požární riziko objektu a veškeré komponenty systému lze považovat za nehořlavé. Všechny kabely jsou vedeny v plastových chráničkách. Prostupy skrz strop a skrz zeď jsou ošetřeny pomocí požárních ucpávek. Napětí jednotlivých stringů je menší než 400 V, proto není nutná dodatečná instalace DC odpojovačů. Kontrola spojů bude provedena každé dva roky. Revize FV systému bude provedena každé čtyři roky.

## Zhodnocení

V úvodních kapitolách práce byly detailně popsány jednotlivé komponenty fotovoltaického systému včetně jejich vlastností. U fotovoltaických modulů byla popsána přeměna slunečního záření na elektrický proud pomocí fotovoltaického jevu a následně výroba různých typů FV článků a jejich vlastnosti. Nejvyšší účinnost má monokrystalický FV článek, proto se nejvíce používá pro výrobu FV modulů. Nejvíce jsem se ale zabýval elektrickými parametry FV článků či modulů, které vychází z voltampérové charakteristiky. Mezi tyto parametry patřily zejména proud nakrátko, napětí naprázdno, bod maximálního výkonu a účinnost FV modulu. Také jsem se zaměřil na vliv klimatických podmínek na tyto elektrické parametry. Tím jsem se snažil vysvětlit, jak funguje FV modul v reálných provozních podmínkách, kde je jejich funkce ovlivněna především hodnotou intenzity slunečního záření nebo okolní teplotou. Na konci první kapitoly byly uvedeny hodnoty optimálního sklonu a optimální orientace FV modulů pro Českou republiku.

Následně jsem pomocí elektrických vlastností popisoval fotovoltaický střídač. Také jsem se zmínil o akumulátorech, jak olověných, tak zejména lithium-iontových. V energetice se jsou nejvíce používány lithium-železo-fosfátové akumulátory s označením  $LiFePO_4$ . Tyto akumulátory ukládají přebytečnou elektrickou energii z FVE. Následně jsem se zabýval stejnosměrnými a střídavými kabely pro fotovoltaiku a dalším elektroinstalačním materiálem, do kterého jsem zařadil ochranné prvky jako přepěťové ochrany, pojistky, jističe, odpojovače apod. Také jsem se zmínil o akumulaci přebytečné energie na ohřev TUV, zejména co tato akumulace představuje a jak je technicky realizována. Nakonec byly fotovoltaické systémy rozděleny podle napojení do distribuční sítě, tedy na off-grid, on-grid a hybridní FV systém. Pro každý typ FV systému bylo vytvořeno blokové schéma.

Hlavní část diplomové práce se týkala návrhu vhodné fotovoltaické elektrárny vzhledem k zátěžovému profilu objektu v modelovém místě. Zátěžový profil domu byl stanoven pomocí seznamu spotřebičů, jejich výkonu a přibližného použití. Přesnější stanovení zátěžového profilu proběhlo pomocí měřicího modulu, kterým byla naměřena reálná spotřeba objektu. Tyto dva získané zátěžové profily byly následně porovnány a optimalizovány pomocí změny využití některých spotřebičů. Celková roční spotřeba objektu byla spočtena na 9,48 MWh. Následně jsem se zabýval určením vhodného výkonu fotovoltaické elektrárny vzhledem k orientaci a sklonu dostupných střech v modelovém

místě. Ještě před začátkem popisu návrhu musím zmínit, že fotovoltaická elektrárna bylo od začátku navrhována jako on-grid systém. Na začátku návrhu byly vybrány konkrétní FV moduly, kterými byly LONGi Solar LR5-66HTH-525M. Následně bylo stanoveno několik výkonových variant FV systému, ke každé variantě byl zvolen vhodný on-grid střídač značky Solax Power. Jednotlivé varianty byl simulovány pomocí softwaru PVsyst a následně porovnány. Bylo zjištěno, že nejvýhodněji vychází FV systém s 16 FV moduly o celkovém výkonu 8,4 kWp, které jsou umístěné na téměř jižní střeše garáže a téměř západní střeše domu.

Také jsem se zabýval porovnáním on-grid FV systému se systémem hybridním, které proběhlo pomocí softwaru PVsyst. Hybridní systém měl lepší využití elektrické energie, ale byl významně dražší, i když bylo navrženo malé bateriové uložení. Po zhodnocení jak energetické, tak i ekonomické stránky vyšel tedy lépe on-grid systém, který měl návratnost 9,1 let, zatímco návratnost hybridního systému vyšla na rovných deset let. A to do těchto výsledků nebyly započítány provozní náklady ani náklady na výměnu střídače nebo baterií po deseti letech. Při započtení těchto nákladů vyšla návratnost on-grid systému na 10,5 let a hybridního až na 16,3 let. Proto jsem do FV systému zakomponoval akumulaci přebytečné energie na ohřev TUV pro lepší využití vyrobené elektrické energie FVE. Využití této akumulace bylo stanoveno na třetinu roku, tedy na čtyři měsíce. Akumulace přebytečné energie na ohřev TUV zlepšila využití elektrické energie o 730 kWh ročně a zvýšila zisk provozu FVE o 3525,9 Kč ročně. Tím pádem došlo i ke snížení návratnosti na 9,4 let i vzhledem k navýšení celkové ceny FV systému o 10 976 Kč včetně DPH. Po započtení ceny dotace dle aktuálních podmínek ve výši 109 000 Kč došlo ke snížení návratnosti tohoto FV systému na 5,3 let.

V závěru práce byla řešena připojitelnost FV systému do distribuční sítě. Přímo z EG.D. jsem získal reálné schéma distribuční sítě v modelovém místě včetně informací o distribučním transformátoru a jednotlivých kabelových vedeních. Následně proběhl výpočet připojitelnosti z programu Grizzly a z programu DNcalc. Výsledkem tohoto výpočtu byla hodnota změny napětí v daných uzlech sítě před a po připojení navržené FVE. Tato změna napětí nesměla překročit hodnotu 3 %, to se nestalo ani v jednom z výpočtů připojitelnosti. Tím pádem bylo vyhodnoceno, že by navržená FVE mohla být do distribuční sítě bez problému připojena. Následně byla navržená fotovoltaická elektrárna zhodnocena ohledně technického provedení, zda vyhovuje zásadám elektrické bezpečnosti, ochrany před

úderem blesku a požární bezpečnosti. Na objektech, kdy by byly instalovány FV moduly by se měla řešit ochrana před úderem blesku.

Během celého návrhu FVE byly aplikovány některé zjednodušující předpoklady. Při tvorbě zátěžového profilu objektu se určilo přibližné použití spotřebičů, se kterým bylo počítáno pro každý den v celém roce. VE skutečnosti je ale použití spotřebičů rozdílné. Pro přesnější určení spotřeby elektrické energie by bylo vhodné sledovat spotřebu objektu po delší dobu a stanovit poté průměr hodnot. Při návrhu výkonu FVE mohl být zvolen jemnější krok mezi jednotlivými výkonovými variantami pro přesnější návrh optimálního výkonu. Dále byla zjednodušena spotřeba elektrické energie na ohřev TUV, která byla stanovena na 6 kWh/den. Pro přesné stanovení této spotřeby by bylo vhodné spotřebu přesně změřit měřicím modulem. Spolu s tím bylo zjednodušeno použití akumulace na ohřev TUV, které bylo předpokládáno na třetinu roku. To by mohlo být upřesněno spočtením počtu slunečních dní během roku z historických dat. Následně by nejspíš vyšly přesnější výsledky ušetřených ročních nákladů a reálnější snížení návratnosti díky instalaci této akumulace. Také došlo k zanedbání změn ceny elektřiny, ty byly stanoveny dle aktuálních podmínek.

Součástí diplomové práce jsou také externí přílohy z důvodu jejich rozsáhlosti. Externí přílohy obsahují dokument s výsledky simulace ze softwaru PVsyst pro navrženou FVE včetně akumulace přebytečné energie na ohřev TUV ve dvou verzích, bez a se započítáním ceny dotace, dále schéma distribuční sítě v modelovém místě, kompletní výsledek výpočtu připojitelnosti z programu Grizzly a jednopólové schéma navržené FVE, ve kterém není zohledněn systém akumulace ohřevu TUV.



## Závěr

Tato diplomová práce se zabývala návrhem fotovoltaické elektrárny s cílem maximalizace efektivity využití vyrobené elektrické energie vzhledem k zátěžovému profilu modelového místa. V práci byl nastíněn celý proces návrhu fotovoltaické elektrárny, který by měl vést k lepšímu pochopení této záležitosti. Po zhodnocení všech navržených variant FVE z energetického i z ekonomického hlediska jsem došel k závěru, že nejvýhodněji vyšel on-grid FV systém o výkonu 8,4 kWp doplněný akumulací přebytečné energie na ohřev TUV.

Finální navržená fotovoltaická elektrárna byla tedy sestavena z 16 FV modulů LONGi Solar LR5-66HTH-525M, které byly rozděleny do dvou stringů o počtu devíti a sedmi kusů. 9 FV modulů bylo umístěno na střechu garáže se sklonem  $30^\circ$  s azimutem  $-10^\circ$  od jihu, 7 modulů bylo umístěno na západní střechu domu o sklonu  $25^\circ$  s azimutem  $65^\circ$ . K tomu byl vybrán on-grid střídač Solax Power X3-MIC-8.0-T-D a tento systém byl dále doplněn regulátorem GBO-Aku kvůli akumulaci přebytečné energie na ohřev TUV. Návrh tohoto FV systému byla vypočtena na 9,4 let včetně započtení provozních nákladů a výměny střídače po deseti letech. V případě započtení ceny dotace se návratnost snížila na 5,3 let.

Podle mého názoru by se měl každý návrh FVE snažit upravit parametry FV systému pro maximalizaci optimalizace spotřeby elektrické energie v daném objektu. Tím by se také mnohdy snížily nároky na distribuční síť nebo návratnost FV systému. Tato diplomová práce by mohla být příkladem, že instalace většího výkonu fotovoltaické elektrárny nebo instalace bateriového uložení není vždy příznivá. Výsledky práce naopak ukázali, že instalace akumulace přebytečné energie na ohřev TUV je výhodná, protože návratnost investice do této akumulace se pohybuje v řádu několika let. Konkrétně u mé navržené FVE vyšla tato návratnost na 3,1 let.

## Literatura

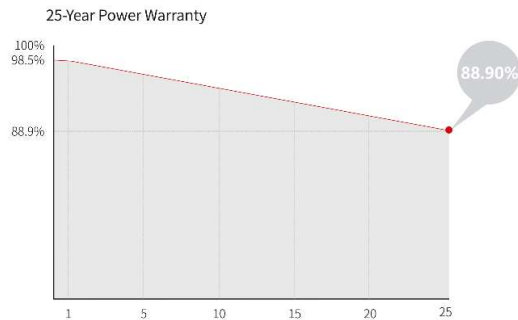
- [1] SOLÁRNÍ ASOCIACE. *Solární rok 2023: Česko se opět řadí mezi „gigawattové“ země, na významu nabývají střední a velké elektrárny* [online]. 10.01.2024 [cit. 24.05.2024]. Dostupné z: <https://www.solarniasociace.cz/solarni-rok-2023-cesko-se-opet-radi-mezi-gigawattove-zeme-na-vyznamu-nabyvaji-stredni-a-velke-elektrarny/>.
- [2] PVSYST. *PVsyst 7.4 – Student* [software]. 26.06.2023 [cit. 24.05.2024]. Dostupné z: <https://www.pvsyst.com/download-pvsyst/>.
- [3] POLEK, Vladislav a LIBRA, Martin. *Konstrukce a výroba fotovoltaických článků* [online]. Časopis Elektro – Odborné časopisy, 2010 [cit. 24.05.2024]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/konstrukce-a-vyroba-fotovoltaickych-clanku-a-panelu--10310>.
- [4] ČEZ. *Solární energie* [online]. 2006 [cit. 24.05.2024]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/solar.htm>.
- [5] ENERGY EDUCATION. *Photovoltaic effect* [online]. [cit. 24.05.2024]. Dostupné z: [https://energyeducation.ca/encyclopedia/Photovoltaic\\_effect](https://energyeducation.ca/encyclopedia/Photovoltaic_effect).
- [6] LIBRA, Martin a POULEK, Vladislav. *Fotovoltaika: teorie i praxe využití solární energie*. Praha: ILSA, 2009. ISBN 978-80-904311-0-2.
- [7] SCHOLZ, Vojtěch. *Vyhodnocení provozu fotovoltaické elektrárny s akumulacním zařízením* [online]. Plzeň, 2020 [cit. 24.05.2024]. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/40210/1/DP%20-%20Scholz%20-%20FV%20elektrarna.pdf>. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Doc. Ing. Miloslava Tesařová, Ph.D.
- [8] KADLEC, Jan. *Fotovoltaické systémy* [online]. Plzeň, 2015 [cit. 24.05.2024]. Dostupné z: [https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/18664/1/BP\\_Kadlec\\_E12B0042K.pdf](https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/18664/1/BP_Kadlec_E12B0042K.pdf). Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni. Ing. Tomáš Klor.
- [9] LIBRA, Martin a POULEK, Vladislav. *Fotovoltaická transformace energie* [online]. Časopis Elektro – Odborné časopisy, 2010 [cit. 24.05.2024]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/fotovoltaicka-transformace-energie--10266>.

- [10] SCHMELLER, Jan. *Projekt fotovoltaické elektrárny o výkonu 200 kW pro energetickou komunitu* [online]. Plzeň, 2021 [cit. 24.05.2024]. Dostupné z: [https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/46036/1/DP\\_Jan\\_Schmeller.pdf](https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/46036/1/DP_Jan_Schmeller.pdf). Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Prof. Ing. Jan ŠKORPIL, CSc.
- [11] ENERGOSOLAR. *Komplexní průvodce různými typy solárních panelů* [online]. 22.03.2023 [cit. 24.05.2024]. Dostupné z: <https://www.energ solar.cz/komplexni-pruvodce-ruznymi-typy-solarnich-panelu/>.
- [12] MASTNÝ, Petr. *Obnovitelné zdroje elektrické energie*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04937-2.
- [13] KLADIVA, Roman. *Dlouhodobé sledování parametrů fotovoltaických panelů* [online]. Brno, 2013 [cit. 24.05.2024]. Dostupné z: [https://www.vut.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=68659](https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=68659). Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Ing. Roman Gvritishvili.
- [14] BECHNÍK, Bronislav. *Nejpoužívanější pojmy ve fotovoltaice* [online]. TZB-info, 29.09.2014 [cit. 24.05.2024]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/11772-nejpouzivanejsi-pojmy-ve-fotovoltaice>.
- [15] NIKL, Ondřej. *Analýza VA charakteristik FVE* [online]. Plzeň, 2016 [cit. 24.05.2024]. Dostupné z: [https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/23000/1/Diplomova-prace\\_Nikl.pdf](https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/23000/1/Diplomova-prace_Nikl.pdf). Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Ing. Milan Bělík, Ph.D.
- [16] NATIONAL ENERGY ACTION (NEA). *How much electricity do solar panels produce?* [online]. [cit. 24.05.2024]. Dostupné z: <https://www.nea.org.uk/who-we-are/innovation-technical-evaluation/solarpv/how-much-electricity-solar-produce/>.
- [17] BECHNÍK, Bronislav. *Optimální orientace a sklon fotovoltaických panelů* [online]. TZB-info, 23.06.2014 [cit. 24.05.2024]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/114865-optimalni-orientace-a-sklon-fotovoltaickych-panelu>.
- [18] MATUŠKA, Tomáš. *Solární zařízení v příkladech*. Stavitel. Praha: Grada, 2013. ISBN 978-80-247-3525-2.
- [19] GOTREK, S. D. *Solární panely, regulátory a baterie – jak se v tom vyznat?* [online]. Nomádem, 2018 [cit. 24.05.2024]. Dostupné z: <https://www.nomadem.cz/clanek/66/solarni-panely-a-regulatory/>.

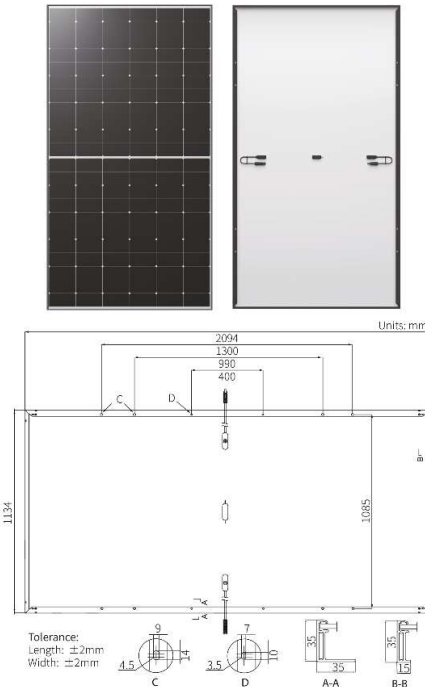
- [20] CZECH RE AGENCY, o.p.s. *Fotovoltaický střídač – účinnost není vše* [online]. TZB-info, 20.04.2009 [cit. 24.05.2024]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/5571-fotovoltaicky-stridac-ucinnost-neni-vse>.
- [21] BATTERY UNIVERSITY. *BU-201: How does the Lead Acid Battery Work* [online]. 21.10.2021 [cit. 24.05.2024]. Dostupné z: <https://batteryuniversity.com/article/bu-201-how-does-the-lead-acid-battery-work>.
- [22] BATTERY UNIVERSITY. *BU-205: Types of Lithium-ion* [online]. 22.10.2021 [cit. 24.05.2024]. Dostupné z: <https://batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-lithium-ion>.
- [23] GWL GROUP, a.s. *JAK NA LIFEPO4 BATERIE*. PDF [online]. [cit. 24.05.2024]. Dostupné z: [https://files.gwl.eu/inc/\\_doc/LFP\\_Guide\\_CZ.pdf](https://files.gwl.eu/inc/_doc/LFP_Guide_CZ.pdf).
- [24] ZEMAN, Daniel. *Návrh technického provedení FVE včetně systému řízení pro komerční objekt v souladu s platnými pravidly pro program úspory energie – FVE* [online]. Brno, 2018 [cit. 24.05.2024]. Dostupné z: [https://www.vut.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=172595](https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=172595).  
Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Doc. Ing. Petr Mastný, Ph.D.
- [25] SLÁMOVÁ, Soňa. *Kabely a příslušenství pro fotovoltaické elektrárny* [online]. Časopis Světlo – Odborné časopisy, 2009 [cit. 24.05.2024]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/casopis/tema/kabely-a-prislusenstvi-pro-fotovoltaicke-elektrarny--15672>.
- [26] EATON. *Komponenty pro FVE*. PDF [online]. [cit. 24.05.2024]. Dostupné z: <https://www.eaton.com/content/dam/eaton/products/electrical-circuit-protection/circuit-breakers/fv-komponenty-cz-2022-nr.pdf>.
- [27] SOLAR CONTROLS, s.r.o. *Základní popis funkce* [online]. [cit. 24.05.2024]. Dostupné z: [https://solarcontrols.cz/cz/watrouter\\_function.html](https://solarcontrols.cz/cz/watrouter_function.html).
- [28] SUPER HUMAN. *Top 5 Differences Between On-Grid and Off-Grid Solar Systems*. In: *Solar Powered Blog* [online]. 2022 [cit. 24.05.2024]. Dostupné z: <https://solarpoweredblog.com/on-grid-vs-off-grid-solar-systems/>.
- [29] NEWKIRK, Martin. *How Solar Power Works – On-Grid, Off-Grid And Hybrid Systems* [online]. 2014 [cit. 24.05.2024]. Dostupné z: <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/2014/5/4/how-solar-works>.

- [30] ČESKÝ HYDROMETEROLOGICKÝ ÚSTAV. *Měsíční a roční data dle zákona 123/1998 Sb.* [online]. [cit. 24.05.2024]. Dostupné z: <https://www.chmi.cz/historicka-data/pocasi/mesicni-data/mesicni-data-dle-z.-123-1998-Sb>.
- [31] NOVINKY. *O fotovoltaické elektrárny je enormní zájem. Ve volbě správného FV systému, však vyniká jeden – SolaX* [online]. Novinky.cz, 30.4.2024 [cit. 24.05.2024]. Dostupné z: <https://www.novinky.cz/clanek/komercni-clanky-o-fotovoltaicke-elektrarny-je-enormni-zajem-ve-volbe-spravneho-fv-systemu-vsak-vynika-jeden-solax-40464912>.
- [32] NOVÁ ZELENÁ ÚSPORÁM. *Dotace pro rodinné domy – standart* [online]. [cit. 24.05.2024]. Dostupné z: <https://novazelenausporam.cz/rodinne-domy/standard/>.
- [33] EG.D. *Zjednodušené připojení mikrozdroje na hladině nízkého napětí* [online]. [cit. 24.05.2024]. Dostupné z: <https://www.egd.cz/zadost/pripojeni-mikrozdroje-elekriny-nn>.
- [34] ROUS, Zdeněk a zastoupení DEHN+SÖHNE v ČR a SROV. *Ochrana solárních panelů a připojených zařízení před bleskem a přepětím* [online]. Časopis Elektro – Odborné časopisy, 2003 [cit. 24.05.2024]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/ochrana-solarnich-panelu-a-pripojenych-zarizeni-pred-bleskem-a-prepetim--14488>.
- [35] PROJEKTY-FOTOVOLTAIKA. *Hromosvody a uzemnění fotovoltaických panelů* [online]. 25.04.2024 [cit. 24.05.2024]. Dostupné z: <https://projekty-fotovoltaika.cz/clanky/hromosvody-a-uzemneni-fotovoltaickych-panelu/>.
- [36] HOŠEK, Zdeněk a generální ředitelství Hasičského záchranného sboru ČR. *Požární bezpečnost fotovoltaických systémů* [online]. Časopis Elektro – Odborné časopisy, 2011 [cit. 24.05.2024]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/pozarni-bezpecnost-fotovoltaickych-systemu--9835>.
- [37] POSPÍŠIL, Libor. *Praktická doporučení pro bezpečnost a požární prevenci střešních FVE* [online]. [cit. 24.05.2024]. Dostupné z: <https://www.hzscr.cz/clanek/prakticka-doporuceni-pro-bezpecnost-a-pozarni-prevenci-stresnich-fve>

## Přílohy:

**Hi-MO X6 Explorer****LR5-66HTH 520~540M****22.7%**  
MAX MODULE  
EFFICIENCY**0~3%**  
POWER  
TOLERANCE**<1.5%**  
FIRST YEAR  
POWER DEGRADATION**0.40%**  
YEAR 2-25  
POWER DEGRADATION**Additional Value****Mechanical Parameters**

Cell Orientation	132 (6×22)
Junction Box	IP68
Output Cable	4mm <sup>2</sup> , +400, -200mm/±1400mm length can be customized
Glass	Single glass, 3.2mm coated tempered glass
Frame	Anodized aluminum alloy frame
Weight	26.0kg
Dimension	2094×1134×35mm
Packaging	31pcs per pallet / 155pcs per 20' GP / 682pcs per 40' HC

**Electrical Characteristics**STC : AM1.5 1000W/m<sup>2</sup> 25°CNOCT : AM1.5 800W/m<sup>2</sup> 20°C 1m/s

Test uncertainty for Pmax: ±3%

Module Type	LR5-66HTH-520M		LR5-66HTH-525M		LR5-66HTH-530M		LR5-66HTH-535M		LR5-66HTH-540M	
	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT
Testing Condition										
Maximum Power (Pmax/W)	520	388.6	525	392.3	530	396.0	535	399.8	540	403.5
Open Circuit Voltage (Voc/V)	47.58	44.68	47.73	44.82	47.88	44.96	48.03	45.10	48.18	45.24
Short Circuit Current (Isc/A)	14.05	11.35	14.12	11.41	14.20	11.47	14.28	11.53	14.36	11.59
Voltage at Maximum Power (Vmp/V)	39.91	36.42	40.06	36.55	40.22	36.70	40.38	36.85	40.53	36.99
Current at Maximum Power (Imp/A)	13.03	10.68	13.11	10.74	13.18	10.80	13.25	10.86	13.33	10.92
Module Efficiency(%)	21.9		22.1		22.3		22.5		22.7	

**Operating Parameters**

Operational Temperature	-40°C ~ +85°C
Power Output Tolerance	0 ~ 3%
Voc and Isc Tolerance	±3%
Maximum System Voltage	DC1500V (IEC/UL)
Maximum Series Fuse Rating	25A
Nominal Operating Cell Temperature	45±2°C
Protection Class	Class II
Fire Rating	UL type 1 or 2 IEC Class C

**Mechanical Loading**

Front Side Maximum Static Loading	5400Pa
Rear Side Maximum Static Loading	2400Pa
Hailstone Test	25mm Hailstone at the speed of 23m/s

**Temperature Ratings (STC)**

Temperature Coefficient of Isc	+0.050%/°C
Temperature Coefficient of Voc	-0.230%/°C
Temperature Coefficient of Pmax	-0.290%/°C

**LONGi**No.8369 Shangyuan Road, Xi'an Economic And  
Technological Development Zone, Xi'an, Shaanxi, China.  
Web: www.longi.comSpecifications included in this datasheet  
are subject to change without notice.  
LONGi reserves the right of final  
interpretation. (20231010BetaV01) DG

	X3-MIC-3.0-T-D	X3-MIC-4.0-T-D	X3-MIC-5.0-T-D	X3-MIC-6.0-T-D	X3-MIC-8.0-T-D	X3-MIC-10.0-T-D	X3-MIC-12.0-T-D	X3-MIC-15.0-T-D
<b>DC VSTUP</b>								
Max. příkon FV pole [Wp]	6000	8000	10000	12000	16000	20000	24000	30000
Max. FV vstupní napětí [V]	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Startovací napětí [V]	120	120	120	120	120	120	120	120
Jmenovité vstupní napětí [V]	640	640	640	640	640	640	640	640
Rozsah napětí sledovače [V]	120~980	120~980	120~980	120~980	120~980	120~980	120~980	120~980
Počet sledovačů/fetězců MPP na sledovač MPP	2(1/1)	2(1/1)	2(1/1)	2(1/1)	2(1/1)	2(1/1)	2(2/1)	2(2/1)
Max. vstupní proud (vstup A/vstup B) [A]	16/16	16/16	16/16	16/16	16/16	16/16	32/16	32/16
Max. zkratový proud (vstup A/vstup B)[A]	18/18	18/18	18/18	18/18	18/18	18/18	36/18	36/18
<b>AC VÝSTUP</b>								
Nominální AC výstupní výkon [W]	3000	4000	5000	6000	8000	10000	12000	15000
Nominální AC výstupní proud [A]	4.3	5.8	7.2	8.7	11.6	14.5	17.4	21.7
Max. zdánlivý výkon AC výstupu [VA]	3300	4400	5500	6600	8800	11000	13200	15000
Max. AC výstupní proud [A]	4.8	6.4	8.0	9.6	12.8	16.0	19.1	22.7
Nominální střídavé napětí [V]	230/400 3~/N/PE							
Nominální frekvence sítě/frekvence sítě [Hz]	50/60							
Účinek výtlaku	0.8 leading-0.8lagging							
THDI (jmenovitý výkon)[%]	<3							
<b>SYSTEM DATA</b>								
Max. účinnost [%]	98.3	98.3	98.3	98.3	98.3	98.3	98.3	98.3
Euro účinnost [%]	97.8	97.8	97.8	97.8	97.8	97.8	97.8	97.8
Spotřeba v pohotovostním režimu Mj@ Night	<3							
Ochrana proti vniknutí	IP66							
Rozsah provozních teplot [°C]	-30~+60 (snížení nad 45)							
Max. provozní výška [m]	4000(snížení nad 3000)							
Vlhkost [%]	0~100							
Typická emise hluku [dB]	<30	<30	<30	<30	<45	<45	<50	<50
Skladovací teplota [°C]	-30~+60							
Rozměry (WxHxD) [mm]	434*342*144.5					434*342*156		
Váha [kg]	15.8	15.8	15.8	15.8	16.9	16.9	17.5	17.5
Koncept chlazení	Přirozené chlazení					Smart fan cooling		
Komunikační rozhraní	USB/ RS485 / Wi-Fi(volitelný) / Pocket lan (volitelný)/4G (volitelný)/ DRM /Adapter box(volitelný)							
<b>OCHRANA</b>								
Ochrana proti přepětí/podpětí	ANO							
DC izolační ochrana	ANO							
DC ochrana proti zpětnému chodu	ANO							
Monitorování sítě	ANO							
DC Injection monitoring	ANO							
Monitorování proudu zpětného napájení	ANO							
Detekce zbytkového proudu	ANO							
Anti-islanding ochrana	ANO							
Over TEMP ochrana	ANO							
SPD	ANO							
*Can be modified without notice.(V2)								

Příloha 2: Technický list řady střídačů Solax Power X3-MIC G2



## X3-HYBRID G4 (TŘÍFÁZOVÝ)

X3-HYBRID-5.0-D X3-HYBRID-6.0-D X3-HYBRID-8.0-D X3-HYBRID-10.0-D X3-HYBRID-12.0-D X3-HYBRID-15.0-D  
 X3-HYBRID-5.0-M X3-HYBRID-6.0-M X3-HYBRID-8.0-M X3-HYBRID-10.0-M X3-HYBRID-12.0-M X3-HYBRID-15.0-M

### DC VSTUP

Max. PV výkon [Wp]	10000	12000	16000	20000	24000	30000
Max. FV vstupní výkon (PV1+PV2) [Wp]	PV1:4000 / PV2:4000	PV1:5000 / PV2:5000	PV1:8500 / PV2:9000	PV1:10500 / PV2:6000	PV1:11000 / PV2:7000	PV1:11000 / PV2:7000
Max. Vstupní napětí FV [V]	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Počáteční vstupní napětí [V]	200	200	200	200	200	200
Jmenovité vstupní napětí [V]	640	640	640	640	640	640
Rozsah napětí MPPT [V]	180 ~ 950	180 ~ 950	180 ~ 950	180 ~ 950	180 ~ 950	180 ~ 950
Počet sledovačů MPPT / řetězců na sledovač MPPT	2 (1 / 1)	2 (1 / 1)	2 (2 / 1)	2 (2 / 1)	2 (2 / 1)	2 (2 / 1)
Max. vstupní proud (vstup PV1 / vstup PV2) [A]	16 / 16	16 / 16	28 / 16	28 / 16	28 / 16	28 / 16
Max. zkratový proud (vstup PV1 / vstup PV2) [A]	20 / 20	20 / 20	35 / 20	35 / 20	35 / 20	35 / 20

### AC VSTUP & VÝSTUP

Nominální AC výstupní výkon [W]	5000	6000	8000	10000	12000	15000
Max. zdánlivý výkon AC výstupu [VA]	5500	6600	8800	11000	13200	15000
Max. AC výstupní proud [A]	8.1	9.7	12.9	16.1	19.3	24.1
Max. zdánlivý výkon vstupu AC [VA]	10000	12000	16000	20000	20000	20000
Max. AC vstupní proud [A]	16.1	19.3	25.8	32.0	32.0	32.0
Jmenovité střídavé napětí [V]	415 / 240; 400 / 230; 380 / 220					
Nominální frekvence sítě [Hz]	50 / 60					
Účinnost	0.8 kapacitní ~ 0.8 induktivní					
THDi (jmenovitý výkon) [%]	<3					

### BATERIE

Typ baterie	Lithium-iontová baterie / olověná baterie					
Rozsah napětí baterie [V]	180 ~ 800					
Max. trvalý nabíjecí / vybíjecí proud [A]	30					

### EPS (OFF-GRID nebo BACK-UP) OUTPUT (s baterií)

Jmenovitý výstupní výkon [W]	5000	6000	8000	10000	12000	15000
Zdánlivý výkon [VA]	7500, 60s	9000, 60s	12000, 60s	15000, 60s	15000, 60s	16500, 60s
Max. trvalý proud [A]	7.2	8.7	11.6	14.5	17.5	21.8
Jmenovité napětí [V]; Frekvence [Hz]	400 / 230; 50 / 60					
Čas přepnutí [ms]	<10					
Paralelní provoz	ANO					

### SYSTEM DATA

Max. účinnost [%]	98.0					
Euro. účinnost [%]	97.7					
Účinnost nabíjení/vybíjení baterie [%] <sup>1)</sup>	98.5 / 97.5					
Stupeň ochrany	IP65					
Rozsah provozních teplot [°C]	-35 ~ +60 (snížení výkonu při +45)					
Max. provozní výška [m]	<3000					
Relativní vlhkost [%]	0 ~ 100					
Typická emise hluku [dB]	<35			<45		
Teplota skladování [°C]	-40 ~ +70					
Rozměry (ŠxVxH) [mm]	503x503x199					
Čistá hmotnost [kg]	30					
Koncept chlazení	Pasivní chlazení			Chytré chlazení		
Komunikační rozhraní	CT/metr (volitelně), externí ovládání RS485, Pocket WiFi (volitelně: Pocket Lan/4G), DRM, USB Upgrade, NTC (volitelně)					

### SPOTŘEBA ENERGIE

Vnitřní spotřeba (noc) [W]	<40W pro pohotovostní režim, <5W pro nečinnost					
----------------------------	--	--	--	--	--	--

### STANDARD

Bezpečnost	EN/IEC62109-1/-2					
EMC	EN61000-6-1/2/3/4; EN61000-3-2/3/11/12					
Certifikace	VDE4105, G99, G98, AS4777, EN50549, CEI 0-21, IEC61727, PEA/MEA, NRS-097-2-1, RD1699, TOR					

①: PV - BAT Max. účinnost 98.5%, BAT - AC Max. účinnost 97.5%.

V2.3. Informace mohou být bez upozornění změněny. 650.00010.00

Příloha 3: Technický list řady střídačů Solax Power X3-HYBRID G4





## Triple Power 3.0

MC0600\*→

HV10230\*→

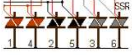


	T-BAT H 3.0 T-BAT H 3.0 V2	T-BAT H 6.0 T-BAT H 6.0 V2	T-BAT H 9.0 T-BAT H 9.0 V2	T-BAT H 12.0 T-BAT H 12.0 V2
Jmenovité napětí[V]	102.4	204.8	307.2	409.6
Rozsah provozního napětí [V]	90 ~ 116	180 ~ 232	270 ~ 348	360 ~ 464
Celková energie [kWh]	3.1	6.1	9.2	12.3
Využitelná energie kWh <sup>①</sup>	2.8	5.5	8.3	11.0
Jmenovitá kapacita [Ah]	30			
Standartní výkon [kW]	2.5	5.1	7.6	10.2
Max. výkon [kW]	3.1	6.1	9.2	12.3
Doporučený nabíjecí/vybíjecí proud [A]	25			
Max. nabíjecí/vybíjecí proud [A] <sup>②</sup>	30			
Účinnost baterie	95%			
Životní cyklus [90% DOD]	6000 Cyklů			
Předpokládaná životnost/ W záruka/rok]	10			
Dostupný rozsah teplot nabíjení/vybíjení[°C]	-30 to 50			
Teplota skladování [°C]	-20 to 50 (3 měsíce)			
Vlhkost [%]	0 ~ 100			
Nadmořská výška [m]	do 3000			
Ochrana	IP65			
System-střídač	RS485 / CAN2.0			
Baterie -baterie / BMS	CAN2.0			
LED indikace	4 LED (25%, 50%, 75%, 100%)			
Master control LED	1 LED			
Vypínač systému (zapnuto/vypnuto)	tlačítko x1+ vypínač x1			
Certifikace	CE, IEC62619, UN38.3, IEC62040, UKCA			
Klasifikace nebezpečných látek	Třída 9			
Rozměry (WxHxD) [mm]	MC0600: 482.5x173.5x153 HV10230: 482.5x471.5x153			
Váha [kg]	MC0600: 7.5 kg +HV10230: 34.5 kg	MC0600: 7.5 kg +2xHV10230: 69 kg	MC0600: 7.5 kg +3xHV10230: 103.5 kg	MC0600: 7.5 kg +4xHV10230: 138 kg

- ① Testovací podmínky: 90% DOD, 0,2C nabíjení a vybíjení @+25 °C
- ② Max. nabíjecí / vybíjecí proud může být varianta s různými modely střídačů

V2.3. Informace mohou být bez upozornění změněny.  
11.00  
650.050

Příloha 4: Technický list baterie Triple Power T30

<b>GBO-AKU Datasheet</b>	
Napájecí napětí:	230V 50Hz (nutné je připojení na tu fázi, na kterou je vyvedena FVE)
Povolené napětí na svorkovnicích:	- horní svorkovnice (vedle LED diod): 5V DC - dolní svorkovnice (napájení regulátoru a kontakty relé): 250V 50Hz (jediná fáze na všech svorkách!)
bipolární analogové vstupy:	3 vstupy, rozsah (-2,5V ... +2,5 V DC) (proti svorce Vcc/2 ) 10 bit D/A převod, pro externí proudové transformátory + volitelné: jeden vestavěný proud. transformátor 0 ... 12A~ (pro jednofázovou verzi)
unipolární analogové vstupy:	2 vstupy, rozsah (0V ... +5,0 V DC) (proti svorce GND ) 10 bit D/A převod, pro snímače napětí a proudu baterie
digitální (dvoustavové) vstupy:	1 vstup 0/5V, (proti svorce GND ) pro načtení signálu NT bezpečnostním kontaktem
digitální výstupy pro plynulé řízení výkonu:	6 výstupů s řídicím signálem 5V/20mA: (pro externí SSR)  <ul style="list-style-type: none"> <li>v současnosti jsou k dispozici firmwary dvojkové řady, podporující pouze 3 výstupy</li> <li>firmwary trojkové řady, podporující všech 6 SSR se připravují. První beta verze firmwaru v.3000 typu "3PI" je k dispozici <a href="#">na tomto odkazu</a>.</li> </ul> <p>1.) (standardně) pro SSR (solid state relay) se spínáním v nule (pulsní modulace), volitelně:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>spíná po jednotlivých, celých sinusových periodách (vždy obě půlvlny - bez ss.složky a vř.rušení, ale zdroj flickru)</li> <li>spíná po půlperiodách (menší flickr, ss.složka)</li> <li>spíná s v jednosekundových cyklech (kombinace tří stavů: vypnuto; každá druhá půlperioda; zapnuto) (nejpriznivější míra flickru při spínání v nule)</li> </ul> <p>2.) nebo (pomocí firmwaru "phctrl") pro SSR s okamžitým spínáním (fázové řízení (*)) - toto provedení nevytváří flickr, generuje ale vyšší harmonické</p> <p><u>každý jeden výstup může ovládat 2 SSR doporučeného typu (s odběrem řídicí elektrody 8,5mA/5V), a dokáže tak <a href="#">symetricky řídit 3-fázový spotřebič</a></u></p> 
reléové výstupy:	celkem 5 relé, každé se spínacím kontaktem 230V~/5A: 4 x relé pro postupné připojování zátěže 1 x relé (K5) s volitelnou funkcí: spínací hodiny, páté relé kaskády, nebo indikace přebyteků
ostatní výstupy:	výstup +5V/20mA pro napájení proudového DC snímače
datové rozhraní pro komunikaci s PC:	RS485, protokol MODBUS, (9600,8,N,1)
regulace spotřeby přebyteků z FVE:	prozatím je v prvním stupni každé fáze plynulé řízení příkonu 0 ... 100% (v jednofázové verzi až kaskáda tří plynule řízených spotřebičů), výhledově bude v prvním stupni každé fáze kaskáda dvou plynule řízených spotřebičů, v jednofázovém provedení kaskáda až šesti plynule řízených spotřebičů v dalších stupních připínání neregulovaných spotřebičů se současnou regulací v prvním stupni
galvanické oddělení: elektrická pevnost mezi elektronikou (5V DC - horní svorkovnice) a silovou částí (230v AC - dolní svorkovnice):	4kV 50Hz, 1 minuta
stupeň krytí (ČSN EN 60529):	IP 20
Doporučené prostředí (ČSN 33 2000-3):	třída AB4 (-5...40°C, 5...95% rel.vlhkosti)
Přípustné skladovací podmínky:	-15...70°C, 5...95% rel.vlhkosti
rozměry [mm] (š,v,hl):	105 x 95 x 59 (skříňka MODULBOX 6M)

Příloha 5: Technický list regulátoru GBO-Aku