

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

---

Fakulta elektrotechnická  
Katedra elektroenergetiky

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**  
Řízení fotovoltaické elektrárny

Autor práce: **Jan Čulík**  
Vedoucí práce: **Milan Bělík**

---

2023

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2022/2023

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	<b>Bc. Jan ČULÍK</b>
Osobní číslo:	<b>E18N0015K</b>
Studijní program:	<b>N2644 Aplikovaná elektrotechnika</b>
Studijní obor:	<b>Aplikovaná elektrotechnika</b>
Téma práce:	<b>Řízení fotovoltaické elektrárny</b>
Zadávací katedra:	<b>Katedra elektroenergetiky</b>

## Zásady pro vypracování

1. Připravte modelový fotovoltaický systém včetně řízení, regulace, akumulace a spotřeby.
2. Navrhněte hardwarové řešení hlavní řídicí jednotky celého systému.
3. Vytvořte algoritmus řídicí jednotky použitelný s ohledem na různé specifické požadavky uživatele.

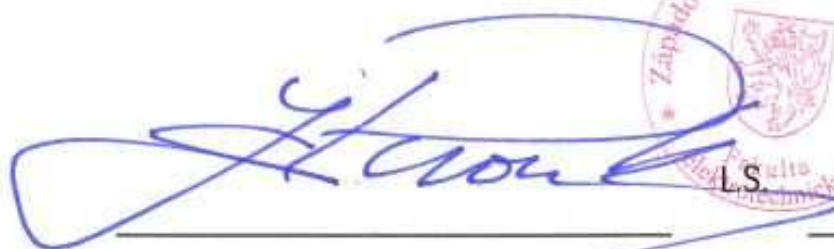
Rozsah diplomové práce: **40 – 60**  
Rozsah grafických prací:  
Forma zpracování diplomové práce: **elektronická**



Seznam doporučené literatury:

1. Libra M., Poulek V.: Solární energie

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

Datum zadání diplomové práce: **7. října 2022**  
Termín odevzdání diplomové práce: **26. května 2023**

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

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

V Plzni dne 7. října 2022

## **Abstrakt**

Práce se v první části zabývá návrhem střešní fotovoltaické elektrárny pro použití v rodinném domě a simulací navržené elektrárny v programu PV Sol. Na tomto modelu je porovnán a kvantifikován vliv řízení spotřeby wattrouterem na omezení přetoků vyrobené elektřiny do sítě. V dalších kapitolách se práce zabývá návrhem a sestavením reálného modelu FVE včetně HW a SW řídicího systému. Navržený systém řízení obsahuje nad rámec běžně dostupného wattrouteru také PLC počítač, který umožňuje dodatečné funkce – především uživatelské nastavení různých režimů a parametrů a vizualizaci toků elektřiny s využitím SCADA systému Promotic. Jsou popsány výhody tohoto řešení a návrhy na další zlepšení.

## **Klíčová slova**

Akumulace elektřiny

Fotovoltaická elektrárna

Hybridní fotovoltaická elektrárna

Komunikace

Měnič

Řídicí systém

PLC

Wattrouter

## **Abstract**

In the first part, this thesis deals with the design of a rooftop photovoltaic power plant for use in a family house and the simulation of the designed power plant in the PV Sol program. This model compares and quantifies the influence of consumption management on limiting the flow of generated electricity into the grid. In other chapters, the thesis deals with the design and construction of a real-world PV plant model, including HW and SW of the control system. In addition to the commonly available wattrouter, the presented control system also includes a PLC computer, which enables additional functions - primarily user settings of various modes and parameters and visualization of electricity flows using the Promotic SCADA system. The advantages of this solution and suggestions for further improvement are described.

## **Keywords**

Accumulation of electricity

Photovoltaic power plant

Hybrid photovoltaic power plant

Communication

Inverter

Control system

PLC

Wattrouter

## **Poděkování**

Děkuji panu Ing. Milanu Bělíkovi, Ph.D. za vedení diplomové práce a cenné návrhy a podněty. Dále děkuji pracovníkům katedry KEI FEL ZČU za zapůjčení PLC počítače.

# Obsah

Úvod.....	- 1 -
1 Teoretický úvod.....	- 4 -
1.1 Historie objevů .....	- 4 -
1.2 Teoretické základy fotovoltaického článku.....	- 4 -
1.3 Základy konstrukce a technologie.....	- 5 -
1.3.1 Fotovoltaický článek.....	- 5 -
1.3.2 Fotovoltaický panel.....	- 6 -
1.3.3 Hlavní součásti fotovoltaické elektrárny .....	- 7 -
1.3.4 Zásady pro projektování .....	- 9 -
2 Návrh modelového fotovoltaického systému .....	- 12 -
2.1 Základní parametry fotovoltaické elektrárny .....	- 12 -
2.2 Zadaná spotřeba nemovitosti.....	- 13 -
2.3 Konstrukce FVE.....	- 14 -
2.3.1 Solární panely .....	- 14 -
2.3.2 Měniče .....	- 15 -
2.3.3 Akumulátor .....	- 16 -
2.3.4 Kabely .....	- 17 -
2.4 Výsledky simulace .....	- 21 -
2.4.1 Prognóza výnosů.....	- 21 -
2.4.2 FV systém .....	- 21 -
2.4.3 Spotřeba .....	- 21 -
2.4.4 Elektromobil .....	- 22 -
2.5 Vliv řízení a akumulace na zvýšení využití přebytků FVE.....	- 24 -
3 Návrh hardware řídicí jednotky .....	- 29 -
3.1 Výběr hardware a jeho limity.....	- 29 -
3.1.1 Mikrokontrolery .....	- 29 -
3.1.2 Programovatelné logické automaty .....	- 29 -
3.1.3 Na míru navržený HW řídicího systému .....	- 30 -
3.2 Vstupy a výstupy ŘS modelové FVE.....	- 30 -

3.2.1	Analogové vstupy 0 až 5 V .....	- 30 -
3.2.2	Digitální výstupy 24 VDC .....	- 30 -
3.3	Komunikace .....	- 30 -
3.3.1	Sériová komunikace RS232 a RS485 .....	- 30 -
3.3.2	Komunikace v počítačové síti.....	- 31 -
4	Návrh algoritmu řídicího systému FVE .....	- 32 -
4.1	Dostupné metody regulace spotřeby .....	- 32 -
4.2	Hromadné dálkové ovládání.....	- 32 -
4.3	Wattrouter.....	- 32 -
4.4	Akumulační spotřebiče.....	- 33 -
4.5	Popis algoritmů řídicího systému.....	- 34 -
4.5.1	Výhody řídicího systému .....	- 34 -
4.5.2	Vizualizace a uživatelské nastavení významných spotřebičů a FVE v jednom uceleném prostředí.....	- 34 -
4.5.3	Možnost vzdáleného přístupu a nastavování uživatelských parametrů přes internet - 35 -	- 35 -
4.5.4	Mírné zvýšení množství spotřebované elektřiny z FVE v místě výroby a odpovídající snížení přetoků do sítě .....	- 35 -
4.5.5	Omezení velikosti hlavního jističe.....	- 36 -
4.5.6	Možnost řízeného prodeje elektřiny do sítě.....	- 36 -
5	Modelová FVE pro ověření funkce základních algoritmů ŘS .....	- 38 -
5.1	Princip fungování modelové FVE.....	- 39 -
5.2	Technická specifikace modelové FVE.....	- 40 -
5.2.1	FVP .....	- 40 -
5.2.2	Měnič .....	- 41 -
5.2.3	Akumulátor .....	- 42 -
5.2.4	Wattrouter .....	- 43 -
5.2.5	Řídicí systém.....	- 43 -
5.2.6	Polovodičové relé .....	- 45 -
5.2.7	Elektromagnetická relé .....	- 45 -
5.2.8	Měření .....	- 46 -
5.2.9	Regulované spotřebiče .....	- 46 -



5.2.10	Umístění v rozvaděči.....	- 47 -
5.3	Zpracování vybraných algoritmů pro řízení modelové FVE .....	- 48 -
5.3.1	Program řídicího systému .....	- 48 -
5.3.2	Program pro vizualizaci a uživatelské nastavení FVE.....	- 49 -
6	Závěr.....	- 50 -
	Literatura.....	- 51 -
	Přílohy.....	I

### **Seznam obrázků**

Obr. 1:	Konstrukce fotovoltaického panelu [12] .....	- 6 -
Obr. 2:	Mapa průměrného ročního slunečního ozáření plochy 1 m <sup>2</sup> v ČR.....	- 9 -
Obr. 3:	Principiální schéma zapojení FVE .....	- 12 -
Obr. 4:	Pohled na fotovoltaické panely .....	- 13 -
Obr. 5:	Spotřeba nemovitosti v průběhu roku.....	- 13 -
Obr. 6:	VA charakteristika FVP SunPower .....	- 14 -
Obr. 7:	Účinnost měniče Symo GEN24 10.0 Plus v závislosti na vytížení.....	- 15 -
Obr. 8:	Účinnost měniče Symo GEN24 8.0 Plus v závislosti na vytížení.....	- 16 -
Obr. 9:	Principiální funkční schéma FVE s řízením spotřeby .....	- 38 -
Obr. 10:	Sestavená modelová FVE.....	- 39 -
Obr. 11:	Instalované fotovoltaické panely .....	- 41 -
Obr. 12:	LFP akumulátor a BMS.....	- 43 -
Obr. 13:	Schématické označení PLC AMIT ART4000 SW .....	- 44 -
Obr. 14:	Umístění zařízení v rozvaděči .....	- 47 -
Obr. 15:	Obrazovka pro ovládání a vizualizaci FVE (prostředí Promotic) .....	- 49 -

### **Seznam grafů**

Graf 1:	Toky energie.....	- 23 -
Graf 2:	Využití solární energie .....	- 23 -
Graf 3:	Krytí spotřeby .....	- 24 -
Graf 4:	Spotřeba elektřiny v objektu modelové FVE .....	- 25 -
Graf 5:	Přebytky výroby FVE s řízenou akumulací, s neřízenou akumulací a bez akumulace.....	- 27 -

## **Seznam tabulek**

Tab. 1: Energetický výnos FVE.....	- 21 -
Tab. 2: Pokrytí spotřeby elektřiny .....	- 21 -
Tab. 3: Nabíjení elektromobilu.....	- 22 -
Tab. 4: Spotřeba elektřiny akumulární a celková.....	- 25 -
Tab. 5: Přebytky výroby FVE s řízenou akumulací, s neřízenou akumulací a bez akumulace.....	- 26 -

## Seznam symbolů a zkratek

Značka	Popisek	Jednotka
<i>AI</i>	Analogový vstup ŘS (Analog Input)	[-]
<i>BMS</i>	Battery Management System	[-]
<i>DO</i>	Digitální výstup ŘS (Digital Output)	[-]
<i>FEL</i>	Fakulta elektrotechnická	[-]
<i>FVE</i>	Fotovoltaická elektrárna	[-]
<i>FVP</i>	Fotovoltaický panel	[-]
<i>I<sub>FVP</sub></i>	proud FVP v MPP režimu	[A]
<i>I<sub>N</sub></i>	Jmenovitý AC elektrický proud vyrobený FVE	[A]
<i>I<sub>DN</sub></i>	Elektrický proud dovolený dle normy pro daný vodič a teplotu	[A]
<i>I<sub>ST</sub></i>	Proud stringu FVE	[A]
<i>k</i>	Korekce na odlišnou teplotu pro výpočet AC kabelů na oteplení	[-]
<i>KEI</i>	Katedra elektroniky a informačních technologií	[-]
<i>L<sub>AC</sub></i>	Délka AC kabelu	[m]
<i>L<sub>DC</sub></i>	Délka DC kabelu	[m]
<i>LFP</i>	Lithium -železo – fosfátový akumulátor	[-]
<i>MPP</i>	Bod nejvyššího výkonu (Maximum Power Point)	
<i>MPPT</i>	Solární regulátor MPP (Maximum Power Point Tracker)	[-]
<i>PLC</i>	Programovatelný logický automat	[-]
<i>PR</i>	Stupeň využití zařízení (Performance Ratio)	[-]
<i>ŘS</i>	Řídicí systém	[-]
<i>S</i>	Průřez vodiče zvolený	[mm <sup>2</sup> ]
<i>S<sub>V</sub></i>	Průřez vodiče vypočtený	[mm <sup>2</sup> ]
<i>SCADA</i>	Dispečerské řízení a sběr dat (Supervisory Control and Data Acquisition)	[-]
<i>SSR</i>	Polovodičové relé (Solid State Relay)	[-]
<i>STC</i>	Standardní testovací podmínky FVP (Standard Test Conditions)	[-]
<i>T<sub>BŽ</sub></i>	Teplota v boileru žádaná	[°C]
<i>T<sub>BS</sub></i>	Teplota v boileru skutečná	[°C]
<i>T<sub>OŽ</sub></i>	Teplota v objektu žádaná	[°C]
<i>T<sub>OS</sub></i>	Teplota v objektu skutečná	[°C]
<i>T<sub>OSAVG</sub></i>	Teplota v objektu skutečná průměrná	[°C]
<i>T<sub>OKAVG</sub></i>	Teplota okolí průměrná	[°C]
<i>U<sub>FVP</sub></i>	Napětí FVP v MPP režimu	[V]
<i>U<sub>ST</sub></i>	Napětí na stringu FVE	[V]
<i>U<sub>S</sub></i>	Síťové 3f napětí	[V]
<i>TCP/IP</i>	Komunikační protokol pro komunikaci v počítačových sítích (Transmission Control Protocol/Internet Protocol)	
<i>VEZ</i>	Vyhrazené elektrické zařízení	[-]
<i>ZČU</i>	Západočeská univerzita	[-]
<i>P</i>	Výkon FVE v režimu MPP	[W]
<i>ΔP<sub>abs</sub></i>	Absolutní ztráty ve vodiči zvoleného průřezu	[W]
<i>ΔP<sub>rel</sub></i>	Relativní ztráty ve vodiči zvoleného průřezu	[-]
<i>δ</i>	Měrný odpor vodiče	[Ω mm <sup>2</sup> /m]
<i>φ</i>	Fázový posuv mezi síťovým napětím a proudem	[rad]
<i>ΔU</i>	Povolený pokles napětí na kabelu	[V]

## Úvod

Pro život, na jaký jsme zvyklí, potřebujeme obrovské množství energie. Pro svoje vynikající vlastnosti je elektřina formou energie, bez které si nejde představit dnešní svět. V roce 2022 dosáhla spotřeba elektrické energie ve světě přes 25 000 TWh/rok [1] a neustále roste. V roce 2020 dosáhl podíl obnovitelných zdrojů elektřiny na globálním energetickém mixu 29 % [2] a tento podíl neustále roste. Aby se současný životní standard stal udržitelný, tak dříve či později bude třeba přejít na 100 % výrobu elektřiny z obnovitelných zdrojů, popřípadě zprovoznit ve velkém měřítku jadernou fúzi nebo rychlé štěpné jaderné reaktory. Pokud bychom vzali v úvahu cíle Pařížské konference ohledně úsilí o omezení oteplování planety na maximálně 1,5 °C oproti stavu před průmyslovou revolucí, tak by bylo nutné přechod na obnovitelné zdroje ještě výrazně urychlit. Jedním z cílů Pařížské dohody je do roku 2050 omezit podíl fosilních zdrojů na primární výrobě energie ze současných cca. 60 % na 8% [3]. Je otázkou, zda je tento cíl reálný, ale trend razantního nárůstu obnovitelných zdrojů v příštích desetiletích je zjevný.

Při současném stavu poznání jsou dle mého názoru pouze tři možná řešení přechodu na udržitelné získávání energie. První možností je zprovoznění jaderné fúze na komerční bázi, kde je ale zatím stále řada zásadních technologických a konstrukčních problémů, které přetrvávají již řadu desetiletí. Druhé řešení je masivní rozvoj štěpných jaderných reaktorů pracujících s rychlými neutrony, které jsou schopné využívat palivo násobně efektivněji než klasické teplovodní jaderné reaktory štěpící pouze „pomalé“ tepelné neutrony. Zde je ale zásadní problém veřejné mínění a v menší míře také technické otázky související s minimalizací možnosti jaderné havárie a s dlouhodobým skladováním vyhořelého paliva. Posledním možným řešením je masivní rozvoj obnovitelných zdrojů. A z obnovitelných zdrojů má z mého pohledu největší potenciál právě solární energie, a to díky třem následujícím nesporným výhodám: prakticky neomezená velikost zdroje, relativně vysoká energetická hustota zdroje a nesporné technické výhody konverze (absence pohyblivých dílů, tichý provoz, snadná montáž) [9].

Průměrný výkon slunečního záření dopadající na 1m<sup>2</sup> plochy zemského povrchu při jasné obloze činí cca 1100 W. Účinnost konverze záření na elektřinu běžně dostupných solárních panelů je dnes bezpečně nad 20 %. Jednoduchým modelovým výpočtem lze dojít k závěru, že pro pokrytí veškeré spotřeby elektřiny na Zemi by teoreticky stačila plocha 13 225 km<sup>2</sup> (čtverec o straně cca 115 km) trvale osvětlená slunečním zářením a pokrytá fotovoltaickými panely s účinností 20 %. Jenom plocha pouště Sahara je skoro o 3 řády větší. To je

samozřejmě pouze myšlenkový experiment, ale dle mého názoru ilustruje potenciál solární energie. Reálné limity výroby elektřiny ze slunečního záření jsou tedy především v nerovnoměrnosti výroby, potažmo v přenosu a akumulaci vyrobené elektřiny a s tím souvisejícími astronomickými náklady. Potřebná celosvětová kapacita skladování elektrické energie k přechodu na plně obnovitelné zdroje je odhadována v řádech vyšších desítek nebo nižších stovek TWh. Přesné číslo je těžké odhadnout a podklady z různých zdrojů se vzájemně liší. Pro celosvětový přechod na elektromobilitu v silniční osobní a nákladní přepravě při současném odhadovaném počtu vozidel přes 1,5 mld dle [8] bude dle mého odhadu třeba cca dalších 100 až 150 TWh akumulované elektrické energie. Možností akumulace elektrické energie je mnoho druhů, avšak aktuální světová agregátní schopnost akumulace energie je v obrovském nepoměru k plánovanému rozvoji obnovitelných zdrojů. V roce 2020 byla instalovaná kapacita pro ukládání elektrické energie cca 9,45 TWh [6]. Z toho více než 90 % byly přečerpávací vodní elektrárny. Bohužel možnosti pro výrazné další rozšíření této technologie jsou relativně omezené především z důvodu omezených geografických možností a zdlouhavých povolovacích procesů. Z mého pohledu je nejkálovatelnější způsob akumulace elektrické energie elektrochemický akumulátor (dnes nejčastěji lithiové akumulátory) a pro aplikace, kde je vyžadována extrémně vysoká energetická hustota pak vodík nebo syntetická paliva. V roce 2021 bylo vyrobeno cca 0,23 TWh elektrochemických akumulátorů (součet produkce pro všechny aplikace) dle [5], z čehož je vidět, že aktuální roční produkce je minimálně o 3 řády nižší než potřebná kapacita. Tedy vybudování potřebné kapacity pro ukládání elektrické energie by trvalo vyšší stovky až nižší tisíce let, pokud bychom všechny vyrobené akumulátory používali pro stabilizaci sítě. Předpokládaná celosvětová produkce elektrochemických akumulátorů v roce 2031 je ale již cca. 6,4 TWh [5], tedy téměř třicetinasobek dnešní produkce. To už je roční produkce, při které je v desítkách let možné dostatečnou kapacitu vybudovat. A je více než pravděpodobné, že produkce dále poroste. Současně bude třeba výrazným způsobem posílit přenosové sítě, aby bylo elektřinu možno transportovat na co největší vzdálenosti s co nejnižšími ztrátami.

Pokud budeme výše uvedené předpovědi považovat za reálné, pak je zřejmé, že technicky je přechod od fosilních k obnovitelným zdrojům v příštích desetiletích realizovatelný, ale současně to jedna z největších technických, ekonomických a sociálních výzev, kterou má lidstvo před sebou. A to je hlavní důvod, proč mě tato problematika dlouhodobě zajímá a také důvod pro volbu mého tématu diplomové práce.

Cílem této práce je alespoň nastínit odpovědi na následující otázky:

- Jak regulovat solární elektrárnu, abychom maximalizovali množství elektřiny využité v místě výroby?
- Jak regulovat solární elektrárnu s akumulací, aby byly sníženy negativní dopady na síť a zvýšeny pozitivní dopady na síť?
- Jak umožnit uživateli monitorovat a měnit aktuální nastavení toků elektrické energie včetně nastavení akumulčních spotřebičů?

V první části v kapitole 1 jsou stručně popsány základní teoretické poznatky nutné k pochopení principu výroby elektřiny ze slunečního záření.

V kapitole 2 je popsán modelový návrh hybridní fotovoltaické elektrárny v programu PV Sol.

V kapitole 4 je zpracován návrh algoritmu řízení modelového fotovoltaického systému který umožňuje zvýšit využití elektrické energie v místě výroby, a tím omezit přetoky do sítě.

V kapitole 2.5 je diskutován a zvolen HW a SW umožňující reálné provedení algoritmu popsaného v kapitole 4.

V kapitole 5 je popsáno jednoduché modelové fotovoltaické zařízení pro demonstraci a možnost provádění experimentů souvisejících s řízením fotovoltaické elektrárny.

V kapitole 6. Závěr jsou diskutovány dosažené výsledky a navrženy kroky pro další zlepšení.

# 1 Teoretický úvod

## 1.1 Historie objevů

Historie objevů, jež vedly k dnešnímu stavu poznání oblasti fotovoltaiky je bohatá a není předmětem této práce. Pro představu uvádím pouze ty nejzásadnější objevy z pohledu problematiky této práce.

James Clerk Maxwell (1831 až 1879) shrnul veškeré do té doby známé zákony ohledně elektřiny a magnetismu do 4 rovnic, které představují ucelenou teorii elektromagnetického pole. Ještě dříve, již roku 1839, francouzský fyzik Alexandre Becquerel objevil fotovoltaický jev, který nedlouho poté umožnil konstrukci prvních fotovoltaických článků. Až poté na začátku 20. století Albert Einstein poskytl ucelené kvantové vysvětlení fotoelektrického jevu, za což dostal roku 1921 Nobelovu cenu.

## 1.2 Teoretické základy fotovoltaického článku

Malá část celkového elektromagnetického vlnění vyzařovaného ze Slunce, která dopadá na povrch planety Země, je zdrojem veškeré naší energie. Viditelné světlo je úzká část spektra tohoto elektromagnetického vlnění, která je viditelná lidským okem. Elektromagnetické vlnění má tzv. duální korpuskulárně vlnový charakter, tedy v některých experimentech se chová jako vlnění, v jiných experimentech se naopak chová jako tok částic – fotonů.

Pro potřeby pochopení principu fotovoltaických článků zde budou uvedeny jen základní informace z obecné teorie, pro hlubší pochopení je třeba vyhledat specializovanou literaturu. Řada pojmů uvedených v této práci není řádně vysvětlena a předpokládá se, že jsou čtenářovi známy, případně je dohledá v odborné literatuře.

Fotoelektrický jev je fyzikální jev, při němž jsou elektrony uvolňovány z atomu v důsledku absorpce elektromagnetického záření. Pokud fotoelektrický jev probíhá uvnitř látky a nedochází k emisi elektronů do okolí, tak hovoříme o vnitřním fotoelektrickém jevu a v našem případě jedné z jeho forem – o fotovoltaickém jevu.

Kvantová teorie fotovoltaického jevu je značně složitá, ale pro naše potřeby postačí následující představa. Foton dopadající s dostatečnou energií na povrch polovodiče může uvolnit elektron z valenčního pásu do vodivostního pásu. Na původním místě elektronu vznikne tzv. díra neboli elementární kladný náboj. Takto uvolněné elektrony se můžou materiálem volně pohybovat.

Matriálem fotovoltaických článků je většinou krystalický křemík, který má dvě odlišně dotované oblasti – oblast typu P (positive) dotovaná většinou atomy bóru, který má tři valenční elektrony a oblast typu N (negative) dotovaná většinou atomy fosforu, jenž má 5 valenčních elektronů. V oblasti kontaktní plochy mezi polovodiči typu P a typu N, které se říká PN přechod, vzniká elektrické pole - potenciálová bariéra. Toto elektrické pole vzniká díky přirozené difusi elektronů z oblasti typu N do oblasti typu P v místě přechodu. Po ustavení rovnováhy tato bariéra zabraňuje dalšímu toku částic mezi oběma oblastmi. Výše popsaný materiál se chová jako polovodičová dioda a při přiložení dostatečné ho napětí v propustném směru vede elektrický proud.

Pokud bude výše popsaná polovodičová dioda mít dostatečnou plochu a bude na ni dopadat sluneční záření o dostatečné energii a vhodné vlnové délce, pak absorpcí fotonů v oblasti PN přechodu dojde k vytvoření páru elektron – díra a díky elektrickému poli v oblasti PN přechodu budou elektrony směřovat do oblasti typu P a díry do oblasti typu N. Na elektrodách článku se objeví elektrické napětí cca 0,5 až 0,6 voltu. Spojíme-li elektrody vnějším obvodem, bude jím procházet elektrický proud.

### 1.3 Základy konstrukce a technologie

#### 1.3.1 Fotovoltaický článek

Abychom dosáhli co největší účinnosti solárního článku, je třeba zajistit, aby oblast PN přechodu byla co nejširší a aby se k ní dostalo co nejvíce fotonů. Oblast N, které je natočená ke slunci je proto velmi tenká a silně dopovaná. Naproti tomu oblast P odvrácená od slunce je výrazně tlustší a slabě dotovaná.

Aby bylo možné z fotovoltaického článku odebírat proud, jsou na přední i zadní straně panelu umístěny kovové elektrody. Na zadní straně je běžná celoplošná elektroda. Na přední straně je třeba, aby elektroda co nejméně bránila průchodu slunečního záření do článku, a proto je konstruována většinou z tenké hliníkové mřížky [7].

Existuje nespočet typů a koncepcí solárních článků. Dominantní jsou solární články na bázi křemíku. Křemík je nejrozšířenější prvek na zemi, avšak nevyskytuje se v dostatečně čisté formě. Je nutné ho získávat z roztaveného křemenného písku při vysokých teplotách a dále ho chemickými procesy vyčistit. Vysoce čistý křemík je pak možné zpracovat do podoby monokrystalu nebo polykrystalu. Polykrystalické články jsou jednodušší na výrobu, ale mají větší vnitřní odpor, a proto jsou méně účinné. S výrazným pokrokem v technologii

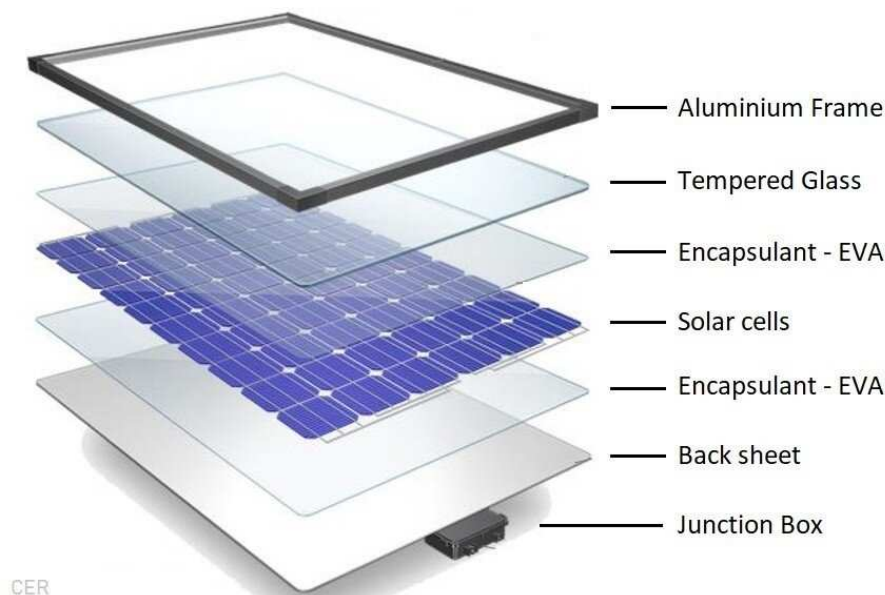


výroby solárních článků se cenový rozdíl mezi polykrystalickými a monokrystalickými články stále snižuje. Dnes je 95 % solárních článků na světě vyráběno na bázi křemíku a 84 % z nich jsou monokrystalické články [11].

### 1.3.2 Fotovoltaický panel

Fotovoltaické články se zapojí sériově do jedné nebo do dvou paralelních větví tvoří fotovoltaický panel. Následující popis konstrukce článků platí pro běžné křemíkové články. Články se oboustranně zapustí do vysoce transparentní plastové folie z etylen – vinyl – acetátu (EVA), čímž jsou chráněny proti povětrnostním vlivy a mechanickému namáhání. Z přední strany panelu následuje vrstva tvrzeného skla a hliníkový rám. Na zadní straně panelu je plastová vrstva sloužící jako mechanická ochrana a elektrická izolace [7] a [12]. Na zadní straně modulu je umístěna propojovací krabice s konektory pro propojení modulů. Propojovací krabice také většinou obsahuje obtokové diody, jejichž význam je vysvětlen v kapitole 1.3.3.

Běžné dostupné fotovoltaické panely pro residenční aplikace dnes mají výkon v rozmezí od cca 100 do 500 W a běžné účinnosti přeměny energie dosahují kolem 20 %. Nejúčinnější komerčně dostupné fotovoltaické panely pro residenční aplikace v roce 2022 dosahují účinnosti 22,8 % [10]. 10 světově nejúčinnějších fotovoltaických panelů dosahuje účinnosti přes 22% výrobci často garantují účinnost minimálně 90 % po dobu 25 let. [10].



Obr. 1: Konstrukce fotovoltaického panelu [12]

### 1.3.3 Hlavní součásti fotovoltaické elektrárny

#### 1.3.3.1 Základní prvky fotovoltaické elektrárny (FVE)

- Fotovoltaické panely (FVP)– více viz kapitola 1.3.2
- Nosná konstrukce FVP – Jedná se o konstrukci, která zajišťuje bezpečné uchycení FVP k nosnému podkladu. Dnes se používají standardizované stavebnicové systémy, které se liší podle nosného podkladu FVP.
- Propojovací kabely

Jedná se o stejnosměrné kabely propojující vzájemně fotovoltaickými panely a měnič. Běžně se používají jednožilové kabely s hliníkovými lankovými vodiči a polyuretanovou izolací H1Z2Z2 K 6 SW s průřezem 4 mm<sup>2</sup> nebo H1Z2Z2 K 6 SW s průřezem 6 mm<sup>2</sup> podle návrhového proudu panelů v daném zapojení. Kabely se vzájemně propojují pomocí standardizovaných konektorů MC4.
- MPPT regulátor

Název vychází z anglického názvu „Maximum Power Point Tracking“. Jedná se o zařízení, které upravuje zatěžovací impedanci solárních panelů v závislosti na jejich teplotě a aktuálním oslunění tak, aby byl maximalizován okamžitý výkon panelů. Jinými slovy MPPT regulátor se snaží udržet FVP v bodě, kde je maximální součin jeho proudu a napětí. Toto zařízení je většinou integrováno v měniči. Pokud je prioritou cena zařízení oproti účinnosti tak do výkonů v řádech stovek wattů je možné použít PWM regulátor, který nijak neupravuje zatěžovací impedanci, pouze reguluje množství předávané energie podle aktuální spotřeby nebo podle uživatelského nastavení.
- Solární měnič

Měnič převádí stejnosměrný proud produkovaný panely nebo akumulátorem na střídavý proud a dále má řadu dalších ochranných a regulačních funkcí podle typu měniče.

  - *Ostrovní měnič (Off grid)* je nejjednodušší a nejlevnější variantou, obsahuje regulátor PWM nebo MPPT, nijak neinteraguje s rozvodnou sítí
  - *Síťový měnič (Grid tie)* – jsou trvale připojené k rozvodné síti, MPPT zajišťuje maximalizaci výroby elektřiny a přebytek je odváděn do sítě, v případě výpadku sítě automaticky odpojí FVE od sítě
  - *Síťový měnič s funkcí záložního zdroje* – Je trvale napájen z akumulátoru, reguluje napětí baterie a přebytečnou energii odvádí do sítě, v případě

výpadku sítě odpojí FVE od sítě, a navíc je schopen napájet vybrané spotřebiče v ostrovním režimu

- *Hybridní měnič* – jedná se o inteligentní měnič, který integruje veškeré funkce výše uvedených měničů v jednom zařízení – napájení z FVP nebo z akumulátoru, případně také z AC záložního zdroje, připojené na síť s možností ostrovního režimu a případně s řadou dalších funkcí

- Jisticí a zemnicí prvky

FVE spadá pod vyhrazená elektrická zařízení (VEZ) a použití jisticích a zemnicích prvků na území ČR se řídí nařízením vlády č. 190/2022 Sb.

### 1.3.3.2 Dodatečné prvky FVE pro zvýšení účinnosti a lokálního využití vyrobené elektřiny

- Akumulátor

Akumulátor akumuluje vyrobenou elektrickou energii ve formě energie chemických vazeb. V základních aplikacích se používají olověné baterie, ve většině komerčních aplikací se používají Li-ion baterie, nejčastěji jejich typ LFP (LiFePO<sub>4</sub>) pro jejich relativně nízkou cenu a výborné bezpečnostní a provozní parametry. Kapacita akumulátorů je závislá na aplikaci a pohybuje se od zlomků kWh až po jednotky GWh. Pozn: Druhé největší bateriové úložiště na světě s kapacitou 1,4 GWh je v provozu v Kalifornii od roku 2022 [13].

- Obtokové diody

Jedná se o polovodičové diody umístěné paralelně k jednotlivým solárním článkům, případně ke skupině článků nebo k celému FVP. V případě výrazného částečného zastínění daného panelu obtoková dioda přemostí zastíněnou oblast, která v danou chvíli vyrábí elektřinu nevyrábí a figuruje v obvodu jako odporová zátěž, čímž ochrání silně zastíněné články před vznikem horkého místa („hot spot“) a současně zvýší účinnost výroby elektrické energie částečně zastíněné FVE. Většina dnes prodávaných FVP má tyto diody integrované.

- Optimizér fotovoltaického panelu

Optimizér plní stejnou funkci jako MPPT regulátor, ale zde je tato funkce aplikována na jeden konkrétní FVP. Optimizér upraví napětí na daném částečně zastíněném FVP tak, aby jim protékal stejný proud, který vyrábějí ostatní nezastíněné FVP. Bez použití optimizéru by bylo napětí na zastíněném panelu obdobné jako na nezastíněných panelech, ale proud by byl výrazně menší, a tím by omezoval proud všemi ostatními panely zapojenými do série.

- Wattrouter

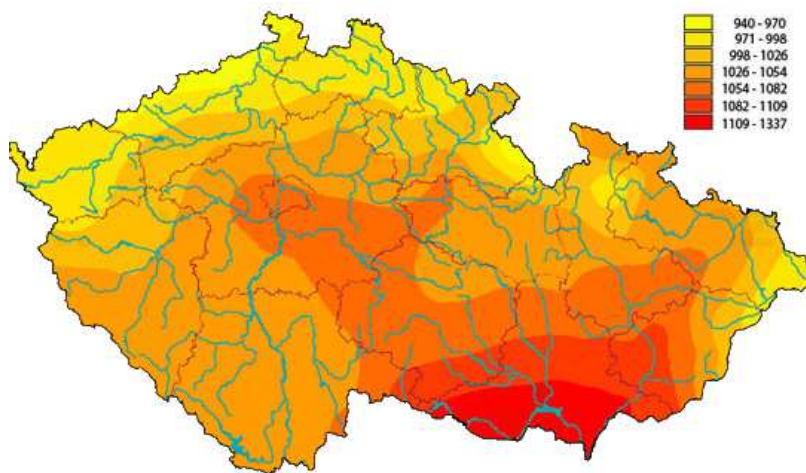
Jedná se o zařízení sloužící k maximalizaci využití elektřiny vyrobené pomocí FVE v místě její výroby. Zařízení měří elektrický proud v místě napojení na veřejnou síť a v případě identifikace přetoků do sítě spíná předvolené spotřebiče.

- Řídicí systém energetiky domu

Jedná se o programovatelné zařízení, které řídí energetickou bilanci celého domu, tedy nejenom výrobu v FVE, ale i regulovatelnou část spotřeby. Tento systém běžně není součástí FVE. Návrh algoritmu a modelového zařízení tohoto systému je popsán v kapitole 4.

### 1.3.4 Zásady pro projektování

Rozhodující parametr pro posouzení vhodnosti dané lokality pro využití sluneční energie je množství dopadajícího slunečního záření na m<sup>2</sup> plochy. V České republice dopadne na jeden m<sup>2</sup> zhruba 940 – 1340 kWh sluneční energie z čehož zhruba tři čtvrtiny připadají na letní období od dubna do září[7].



Obr. 2: Mapa průměrného ročního slunečního ozáření plochy 1 m<sup>2</sup> v ČR

V České republice dostaneme maximálního ozáření na jižních plochách se sklonem cca 30°, ale změna v ročním ozáření není výrazná (do 10 %) u střech se sklonem 10° až 50° u jihovýchodní nebo jihozápadní orientace střechy [7]. U střech se sklonem větším než 12° je efekt samočištění dostatečný a není třeba provádět pravidelné čištění panelů.

Naprostou zásadním předpokladem dobrého výnosu je minimální zastínění. Čím blíže je objekt způsobující stín, tím nepříjemnější je jeho působení. V krajním případě může ve zcela

zastíněném článku vzniknout tzv. horký bod („hot spot“), kdy veškerý proud vyrobený nezastíněnými články zapojenými v sérii prochází článkem, který proud nevyrábí. Ten se chová jako odpor a výkon se zde přeměňuje na teplo. Hrozí až poškození článku. Působení zastínění a jeho negativních jevů na výnosnost a životnost zařízení lze také omezit vhodnou konstrukcí panelů s obtokovými diodami a dále vhodným zapojením článků přes více oddělených MPPT solárních regulátorů a solárními optimizéry (více viz kapitola 1.3.3) na jednotlivých panelech. Pro určení ztrát lokálním zastíněním se provádí analýza zastínění.

Na typovém štítku solárního panelu jsou uvedeny maximální hodnoty výkonu, proudu a napětí daného panelu, dále hodnoty napětí naprázdno a zkratový proud. V provozu však solární panely jenom výjimečně pracují s těmito jmenovitými hodnotami. Reálné hodnoty napětí a proudu závisí na aktuálních podmínkách. Proud panelu je silně ovlivněn intenzitou ozáření. Napětí naopak závisí na teplotě. V zimě může napětí narůst až 20 % nad jmenovitou hodnotu [7]. V horkých letních dnech klesá napětí panelů pod jmenovitou hodnotu a s napětím klesá i účinnost a výkon. Přesto díky výrazně vyšší době ozáření a intenzitě záření jsou v našich podmínkách výnosy v létě podstatně vyšší než v zimním období. Pro maximální účinnost panelů je vhodné zajistit dostatečné zadní odvětrání panelů.

Jednotlivé panely se sériově propojí a vytvoří tzv. větev (String). Jednotlivé větve se pak paralelně propojí buď přímo na svorkovnici střídače nebo při více větvích v sružovací krabici před střídačem. Pokud jsou solární panely umístěny na plochách s odlišnou orientací (např. východní a západní část střechy), pak je nezbytné je díky odlišnému zastínění zapojit odděleně ke dvěma střídačům, případně na vícekanálový střídač. Střídač zajišťuje transformaci napětí na AC, dále pak ochranné funkce a sledování provozních dat. Ve střídači je většinou integrován MPP solární regulátor (Maximum Power Point Tracker), který přizpůsobuje napětí panelů tak, aby jejich pracovní bod byl v bodě maximálního výkonu. Solární regulátor může být instalován i samostatně před střídačem, případně pro vybrané aplikace (ostrovní provoz DC sítě) může být provozován samostatně bez střídače.

Fotovoltaické systémy mohou být buď nezávislé na rozvodové síti, tzv. Off grid systémy neboli ostrovní systémy nebo mohou být připojené k rozvodové síti, tzv. On grid systémy. Připojení On grid systémů podléhá schválení regulačního úřadu. On grid systémy s akumulací a případně s dalšími funkcemi, se nazývají hybridní.

Pro hybridní systémy máme volbu mezi dvěma koncepty – AC coupled a DC coupled. Systém AC coupled mají akumulátor připojený na AC straně střídače, což zjednodušuje instalaci a umožňuje účinné nabíjení akumulátoru z rozvodné sítě (např. v době nízkého tarifu). Na druhou stranu je zde mírně nižší účinnost, protože dochází k vícenásobné

transformaci elektřiny před jejím finálním využitím. DC coupled systémy mají akumulátor připojený na DC straně, čímž se mírně zvyšuje účinnost, ale komplikuje se zapojení (DC kabeláž pro akumulátor) a napájení z rozvodné sítě. Při návrhu je třeba zvážit výhody a nevýhody jednotlivých systémů s ohledem na danou aplikaci. V neposlední řadě je třeba dodržet plané bezpečnostní a EMC normy.

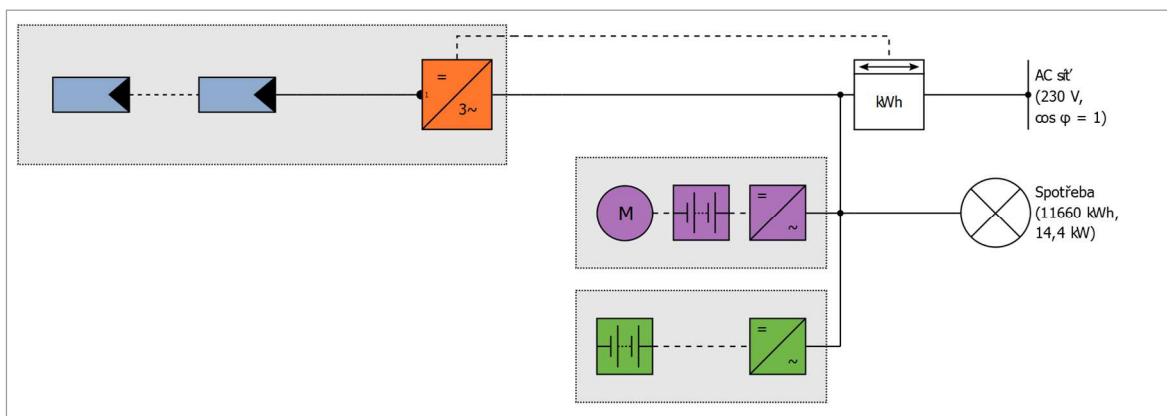
## 2 Návrh modelového fotovoltaického systému

V této části práce jsem s využitím studentské verze programu PV Sol navrhl modelovou střešní fotovoltaickou solární elektrárnu s akumulací energie. Využití solární energie se následně pokusím zvýšit pomocí řízení popsaného v dalších kapitolách.

### 2.1 Základní parametry fotovoltaické elektrárny

Poloha	Abertamy, okres Karlovy Vary	
Typ elektrárny	S akumulčním systémem připojená k rozvodové síť	
Instalovaný výkon	18,45	kWp
Plocha FV modulů	85,3	m <sup>2</sup>
Počet FV modulů	45	
Počet měničů	2	
Počet bateriových systémů	1	
Počet elektromobilů	1	

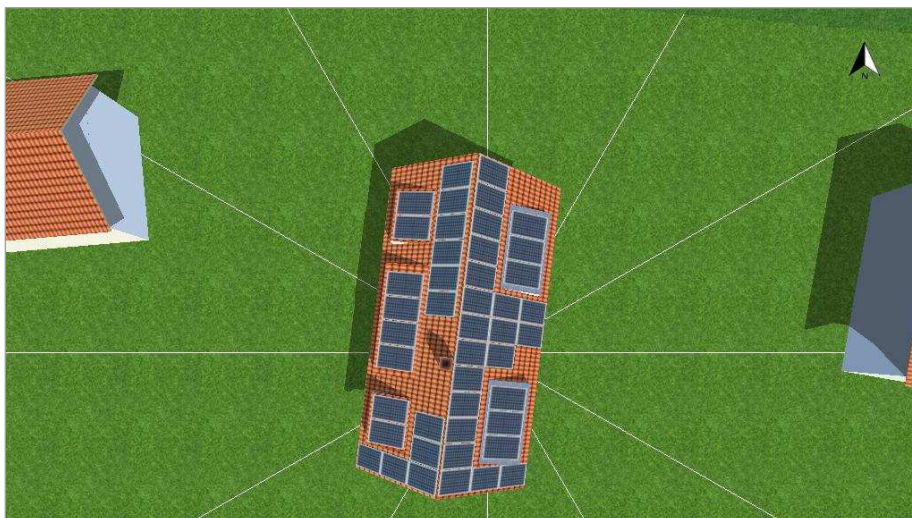
Principiální schéma zapojení FVE je uvedeno zde:



Obr. 3: Principiální schéma zapojení FVE

Detailní schéma zapojení je uvedeno v příloze [2].

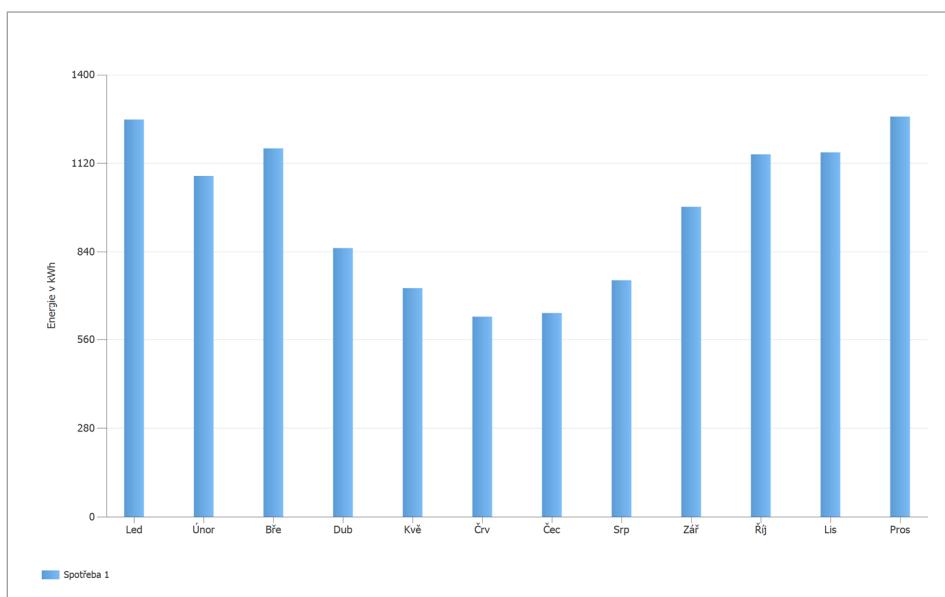




Obr. 4: Pohled na fotovoltaické panely

## 2.2 Zadaná spotřeba nemovitosti

Celková spotřeba, včetně vlastní spotřeby	11660	kWh
Špičkové zatížení	14,4	kW
Pračka	291	kWh
Lednice	380	kWh
Myčka	621	kWh
Osvětlení a ostatní drobné spotřebiče	718	kWh
Sauna	1380	kWh
Vaření – varná deska, sporák, rychlovarná konvice	2738	kWh
Ohřev vody v boileru	2000	kWh
Vytápění – tepelné čerpadlo	3533	kWh



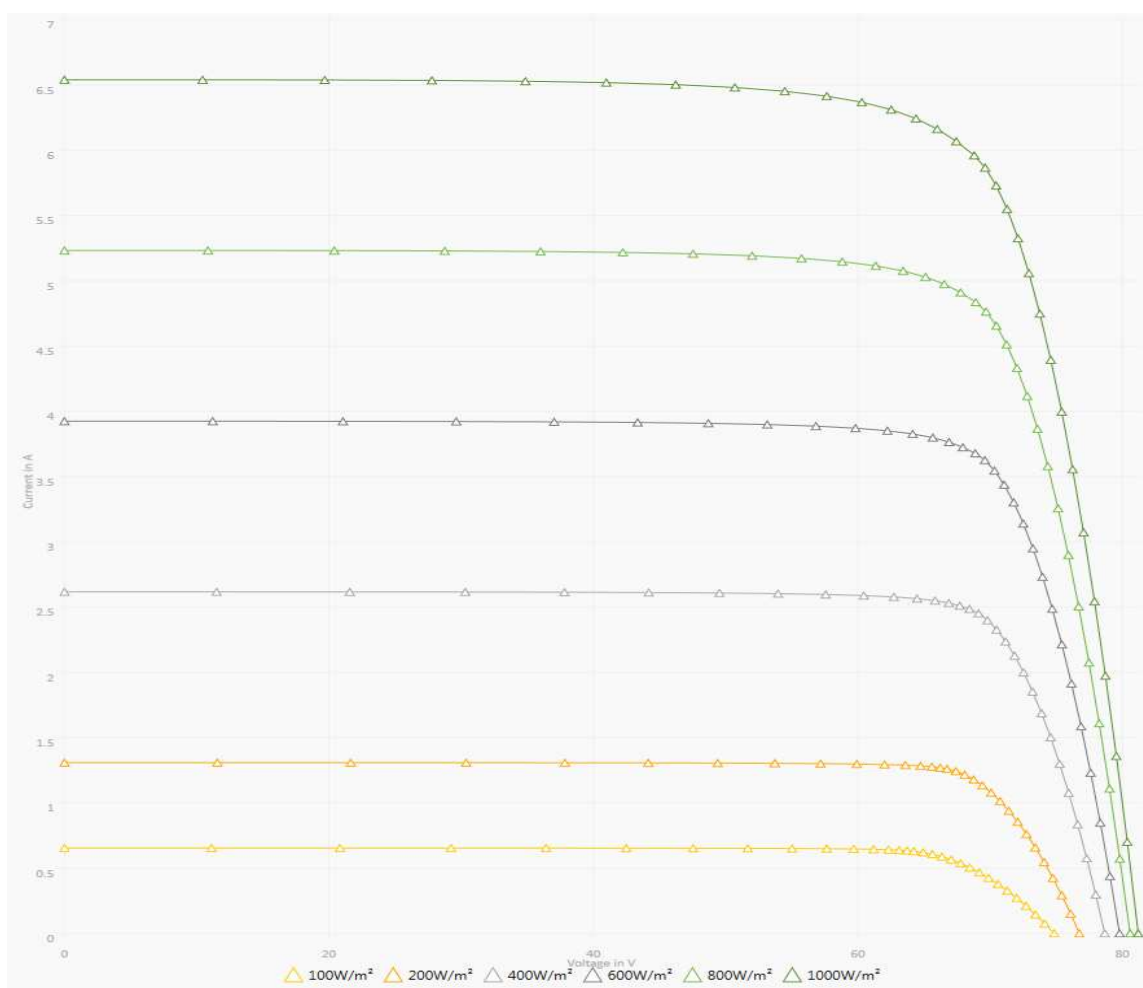
Obr. 5: Spotřeba nemovitosti v průběhu roku



## 2.3 Konstrukce FVE

### 2.3.1 Solární panely

FV moduly	45 x SPR-MAX3-410-BLK (v1)
Výrobce	SunPower
Sklon	45° střecha / 25° vikýře
Orientace	Východ 97°/ Západ 277°
Situace při vestavbě	Souběžně se střechou – zadní odvětrání
Výkon panelu	410 Wp
Rozměry	1812 x 1046 x 40
Účinnost	21,63%
Napětí panelu v pracovním bodě MPP dle STC	68,8 V
Proud panelu v pracovním bodě MPP STC	5,96 A

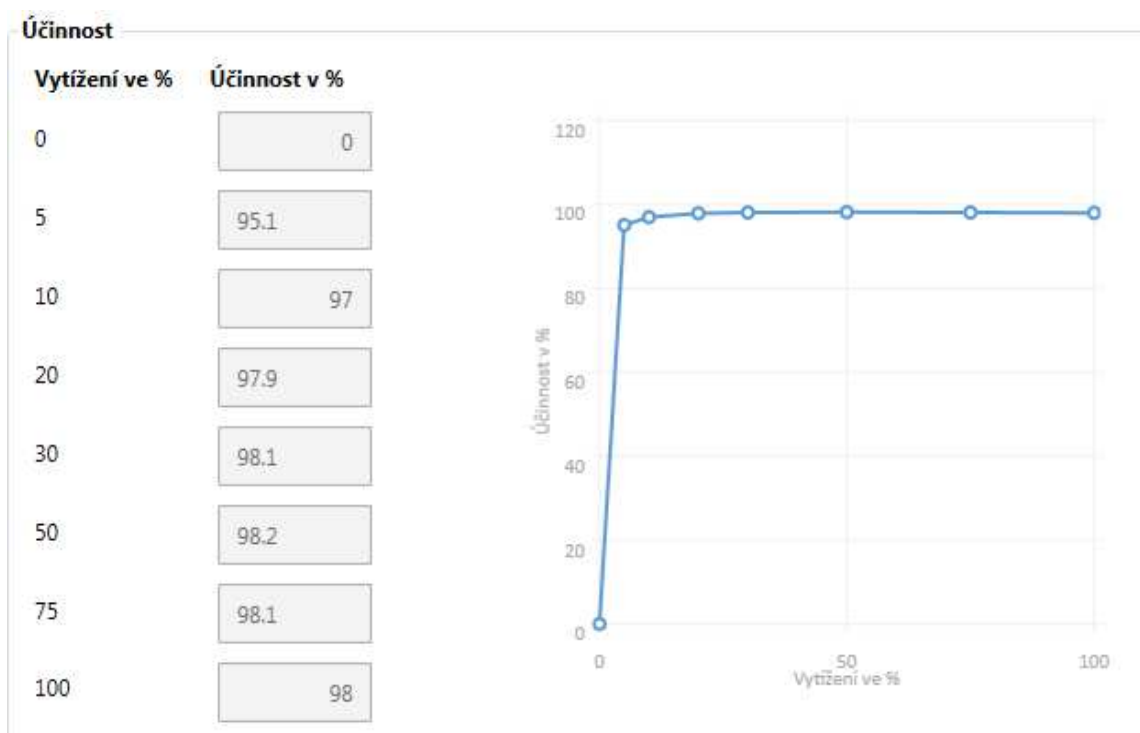


Obr. 6: VA charakteristika FVP SunPower

### 2.3.2 Měníče

#### Měníč 1

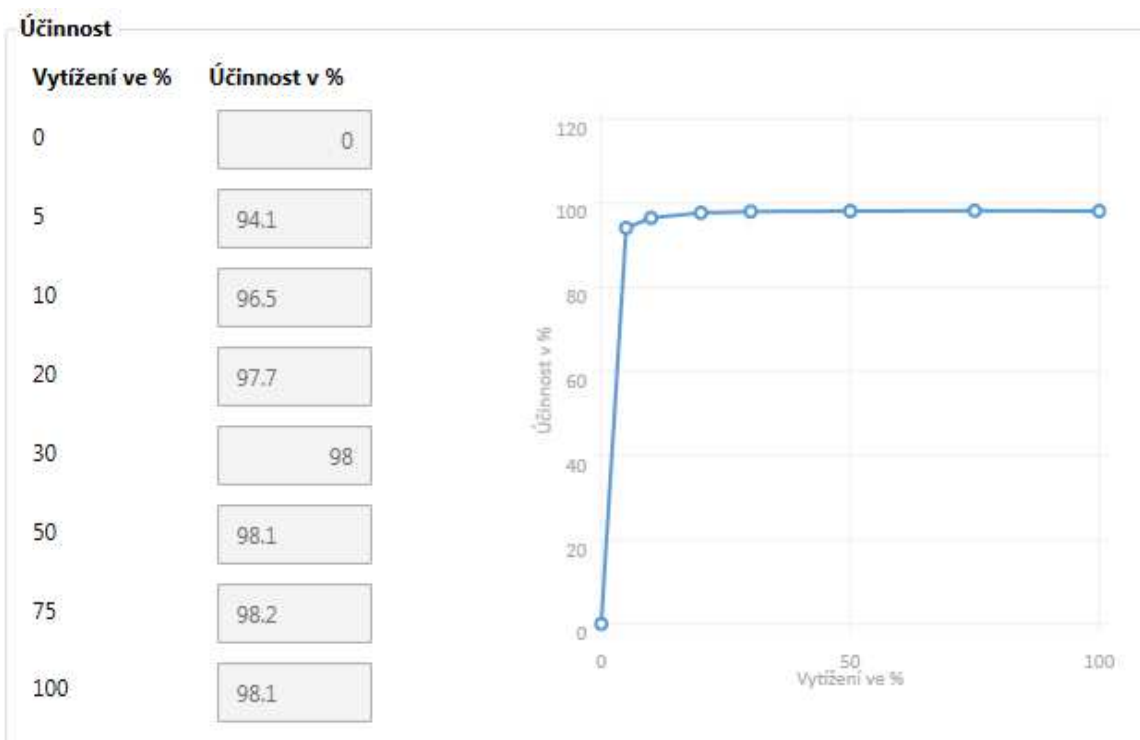
Plochy modulů	Východní část střechy
Model	Symo GEN24 10.0 Plus (v3)
Výrobce	Fronius International
Počet	1
Faktor dimenzování střídače	106,6 %
Konfigurace	MPP 1:
	2 x 10
	MPP 2:
	1 x 3 + 1 x 3



Obr. 7: Účinnost měniče Symo GEN24 10.0 Plus v závislosti na vytížení

#### Měníč 2

Plochy modulů	Západní část střechy
Model	Symo GEN24 8.0 Plus (v3)
Výrobce	Fronius International
Počet	1
Faktor dimenzování střídače	97,4 %
Konfigurace	MPP 1:
	1 x 9
	MPP 2:
	1 x 4 + 1 x 2 + 1 x 2 + 1 x 2
	Symo GEN24 8.0 Plus (v3)



Obr. 8: Účinnost měniče Symo GEN24 8.0 Plus v závislosti na vytížení

System je navržen se dvěma hybridními měniči Fronius. Každá strana střechy má svůj měnič a každý měnič je vybaven dvěma MPPT. S ohledem na proudové a napět'ové zatížení MPPT regulátorů jsou do každého měniče zapojeny paralelně dvě větve, každá do jednoho MPPT viz schéma zapojení uvedené v příloze [2].

### 2.3.3 Akumulátor

Model	Symo GEN24 6.0_to_10.0 Plus + BYD B-Box Premium HVM22.1 (22,08 kWh) (v1)
Výrobce	Fronius International
Počet	1
Bateriový měnič	
Typ připojení	AC připojení
Jmenovitý výkon	8,99 kW
Baterie	
Výrobce	BYD Company Ltd.
Model	HVM (v1)
Počet	8
Energie baterie	22,1 kWh
Typ akumulátoru	Lithium-železo-fosfát (LiFePo)

System je navržen s akumulátorem LFP, které jsou běžně používané pro stacionární využití pro svoje vynikající provozní, bezpečnostní a cenové parametry – odolnost vůči vzplanutí, možnost hlubokého vybití a plného nabití s minimálním dopadem na životnost baterie, vysoký počet nabíjecích cyklů a relativně nízká cena v porovnání s jinými typy Li-ion baterií.

### 2.3.4 Kabely

#### 2.3.4.1 DC kabely – kontrola na úbytek napětí a velikost ztrát

Základní parametry použitých kabelů jsou uvedeny v následující tabulce:

<b>DC kabely</b> (FVP až měnič)	
Délka	150 m
Materiál vodiče	Hliník
Průřez vodiče	4 mm <sup>2</sup>
Označení	H1Z2Z2-K 4 SW

#### Kontrola navržených DC vodičů pro MPPT1 měniče 1

Zadané hodnoty:

Parametr / Veličina	Symbol a rozměr	Hodnota
zapojení panelů		sériově
počet panelů [-]	P <sub>CS</sub>	10
proud panelu v MPP režimu	I <sub>FVP</sub> [A]	6,13
napětí panelu v MPP režimu	U <sub>FVP</sub> [V]	66,9
měrný odpor Al vodiče	δ [Ω mm <sup>2</sup> /m]	0,0278
délka vodiče (oba směry)	L <sub>DC</sub> [m]	30
povolený pokles napětí	ΔU [V]	2%

Výpočet:

Napětí daného stringu:

$$U_{ST} = U_{FVP} * P_{CS} = 66,9 * 10 = 669 V \quad (1)$$

Proud daného stringu:

$$I_{ST} = I_{FVP} = 6,13 A \quad (2)$$

Pro výpočet potřebného průřezu vodiče vyjdeme z Ohmova zákona:

$$\Delta U = R * I_{ST} = \frac{\delta * L_{DC}}{S_V} * I_{ST} \quad (3)$$

Ze (3) vytkneme  $S_V$  a dosadíme číselné hodnoty:

$$S_V = \frac{\delta * L}{\Delta U} * I = \frac{0,0278 * 30 * 6,13}{0,02 * 669} \doteq 0,4 \text{ mm}^2 \quad (4)$$

Zvolený průřez DC vodiče  $S=4 \text{ mm}^2$  s rezervou vyhoví požadavku na povolený pokles napětí 2 %. Běžně se nepoužívají pro solární elektrárny kabely s průřezem nižším než  $4 \text{ mm}^2$  především z důvodu minimalizace ztrát.

Absolutní ztráty ve vodiči zvoleného průřezu S:

$$\Delta P_{abs} = R * I^2 = \frac{\delta * L_{DC}}{S} * I^2 = \frac{0,0278 * 30}{4} * 6,13^2 \doteq 7,8 \text{ W} \quad (5)$$

Relativní ztráty ve vodiči zvoleného průřezu S:

$$\Delta P_{rel} = \frac{\Delta P_{abs}}{P} = \frac{7,8}{669 * 6,13} \doteq 0,2\% \quad (6)$$

Pokud bychom volili průřez DC vodiče pouze podle povoleného úbytku napětí, tak by námi použitý vodič měl ztráty cca 2 %, což by bylo značně neekonomické.

#### Výsledky pro MPPT1 měniče 1:

Parametr / Veličina	Symbol a rozměr	Hodnota
napětí stringu	$U_{ST}$ [V]	669
proud stringu	$I_{ST}$ [A]	6,13
průřez vodiče vypočtený	$S_V$ [mm <sup>2</sup> ]	0,4
průřez vodiče zvolený	S [mm <sup>2</sup> ]	4
Absolutní ztráty	$\Delta P$ [W]	7,8
Relativní ztráty	$\Delta P$ [%]	0,2%

#### Shrnutí výsledků všech DC kabelů pro všechny měniče a MPPT:

Specifikace stringu	Počet panelů v sérii	Průřez kabelu S [mm <sup>2</sup> ]	$\Delta P_{abs}$ [W]	$\Delta P_{rel}$ [%]
Měnič 1, MPPT1, string 1	10	4	7,8	0,19%
Měnič 1, MPPT1, string 2	10	4	7,8	0,19%
Měnič 1, MPPT2, string 1	6	4	7,8	0,32%
Měnič 2, MPPT1, string 1	9	4	7,8	0,21%
Měnič 2, MPPT2, string 1	10	4	7,8	0,19%

## 2.3.4.2 AC kabely – kontrola na oteplení vodiče a velikost ztrát

<b>AC kabely</b> (měnič až hlavní jistič)	
Délka	40 m
Materiál vodiče	Měď
Průřez vodiče	6 mm <sup>2</sup>
Označení	CYKY-J 5x6

*Zadané hodnoty:*

Parametr / Veličina	Symbol a rozměr	Hodnota
délka kabelu	$L_{AC}$ [m]	20
průřez vodiče zvolený	$S$ [mm <sup>2</sup> ]	6
měrný odpor Cu vodiče	$\delta$ [ $\Omega$ mm <sup>2</sup> /m]	0,0178
síťové 3f napětí	$U_s$ [V]	400
Výkon FVE v MPP	$P$ [kW]	18,5
účiník	$\cos \varphi$	1

*Výpočet:*

Uvedený výpočet je na základě normy ČSN 33 2000-5-52 ED.2.

$$I_N = \frac{P}{\sqrt{3} U_s \cos \varphi} = \frac{18500}{\sqrt{3} * 400 * 1} \doteq 26,7A \quad (7)$$

Dovolený proud pro vodiče s průřezem 6 mm<sup>2</sup> při třech zatížených vodičích s uložením typu C (kabely vícežilové na zdi, ve zdivu, na podlaze) při okolní teplotě 30 °C je 41 A. AC kabely budou uloženy uvnitř objektu, kde uvažujeme dimenzovací teplotu 30 °C, korekce na odlišnou teplotu se tedy neaplikuje (koeficient korekce je roven jedné).

$$I_D = k * I_{DN} = 1 * 41 = 41A \quad (8)$$

$$I_D > I_N \rightarrow \text{navržený kabel vyhovuje} \quad (9)$$

Absolutní ztráty ve vodiči zvoleného průřezu S:

$$\Delta P_{abs} = R * I^2 = \frac{\delta * L_{AC}}{S} * I^2 = \frac{0,0178 * 20}{6} * 26,7^2 \doteq 42,3W \quad (10)$$

Relativní ztráty ve vodiči zvoleného průřezu S:

$$\Delta P_{rel} = \frac{\Delta P_{abs}}{P} = \frac{42,3}{18500} \doteq 0,23\% \quad (11)$$

Výsledky:

Parametr / Veličina	Symbol a rozměr	Hodnota
nominální proud A	$I_N$ [A]	26,7
dovolený proud dle normy pro nominální teplotu okolního vzduchu 30°C	$I_{DN}$ [A]	41
korekce na odlišnou teplotu	k	1
Absolutní ztráty	$\Delta P_{abs}$ [W]	42,3
Relativní ztráty	$\Delta P_{rel}$ [%]	0,23 %

## 2.4 Výsledky simulace

### 2.4.1 Prognóza výnosů

Stupeň využití zařízení (PR)	86,47	%
Snížení výnosu zastíněním	12,2	%/Rok
Energetický výnos FVS (AC síť)	14 085	kWh/Rok
Přímá vlastní spotřeba	2 814	kWh/Rok
Nabíjení baterie	4 056	kWh/Rok
Nabíjení elektromobilu	1 858	kWh/Rok
Dodávka do sítě	5 357	kWh/Rok
Podíl vlastní spotřeby	61,7	%
Stupeň soběstačnosti	49,9	%

### 2.4.2 FV systém

Instalovaný výkon	18,45	kWp
Spec. Roční výnos	758,43	kWh/kWp
Stupeň využití zařízení (PR)	86,47	%
Energetický výnos FVS (AC síť)	14 085	kWh/Rok
Přímá vlastní spotřeba	2 814	kWh/Rok
Nabíjení baterie	4 056	kWh/Rok
Nabíjení elektromobilu	1 858	kWh/Rok
Ztráta energie omezením výkonu v místě připojení	0	kWh/Rok
Dodávka do sítě	5 357	kWh/Rok
Podíl vlastní spotřeby	61,7	%

**Energetický výnos FVS (AC síť)**

- Přímá vlastní spotřeba
- Nabíjení baterie
- Nabíjení elektromobilu
- Ztráta energie omezením výkonu v místě připojení
- Dodávka/napájení sítě

Tab. 1: Energetický výnos FVE

### 2.4.3 Spotřeba

Spotřeba	11 660	kWh/Rok
Spotřeba v provozní pohotovosti (Střídač)	92	kWh/Rok
Nabíjení elektromobilu	5 265	kWh/Rok
Celková spotřeba, včetně vlastní spotřeby	17 017	kWh/Rok
pokryto FVS	4 672	kWh/Rok
pokryto ze sítě	8 518	kWh/Rok
pokryto z baterií netto	3 828	kWh/Rok
pokryto elektromobilem	0	kWh/Rok
Podíl pokrytí solární energií	49,9	%

**Celková spotřeba, včetně vlastní spotřeby**

- pokryto FVS
- pokryto ze sítě
- pokryto z baterií netto
- pokryto elektromobilem

Tab. 2: Pokrytí spotřeby elektřiny

Podíl pokrytí vlastní spotřeby modelovou FVE lze zvýšit až o 1202 kWh na 57 % využitím řízené akumulace dle výsledků kapitoly 2.5.

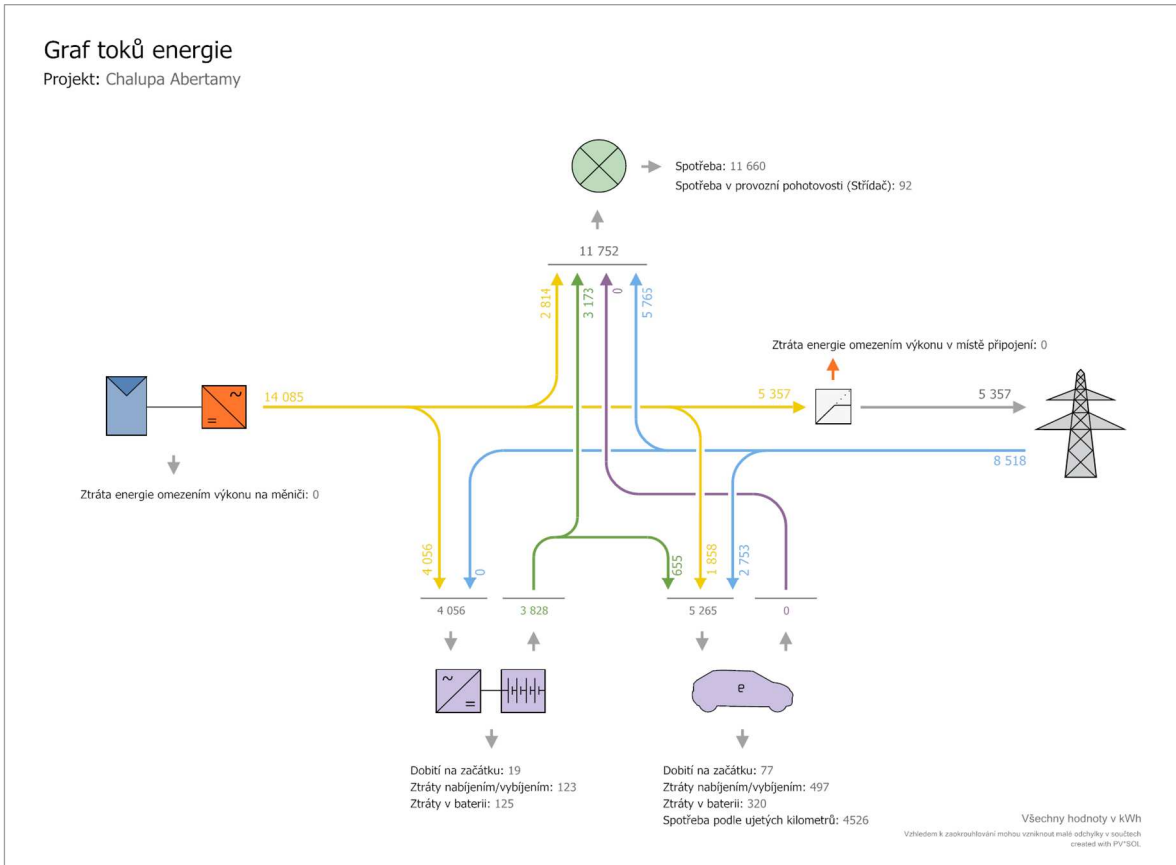


## 2.4.4 Elektromobil

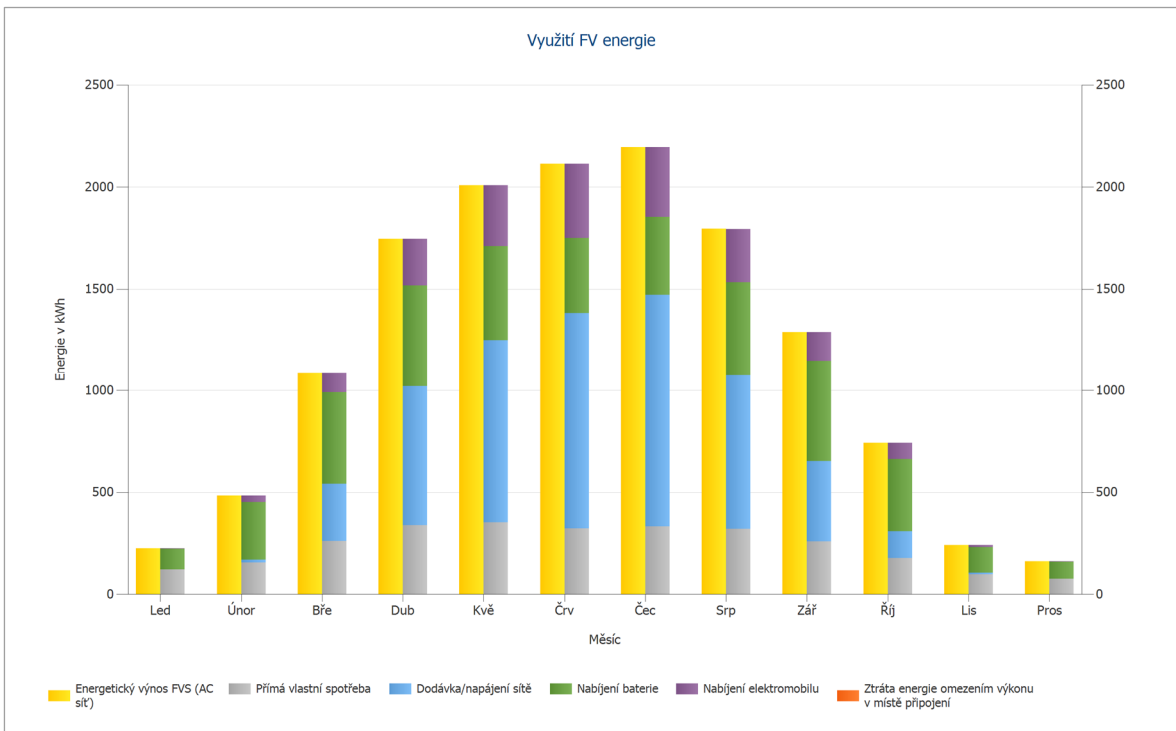
Dobití na začátku	77	kWh	<p>Nabíjení elektromobilu (Celkem)</p> <p> <span style="color: yellow;">■</span> pokryto FVS    <span style="color: blue;">■</span> pokryto ze sítě  <span style="color: green;">■</span> pokryto z baterií </p>
Nabíjení elektromobilu (Celkem)	5 265	kWh/Rok	
pokryto FVS	1 858	kWh/Rok	
pokryto z baterií	655	kWh/Rok	
pokryto ze sítě	2 753	kWh/Rok	
Vybití elektromobilu k pokrytí spotřeby	0	kWh/Rok	
Ztráty nabíjením/vybíjením	497	kWh/Rok	
Ztráty v baterii	320	kWh/Rok	
Spotřeba podle ujetých kilometrů	4526	kWh/Rok	
Roční nájezd	20857	km/Rok	
z toho solární roční nájezd elektromobilu	9951	km/Rok	

Tab. 3: Nabíjení elektromobilu

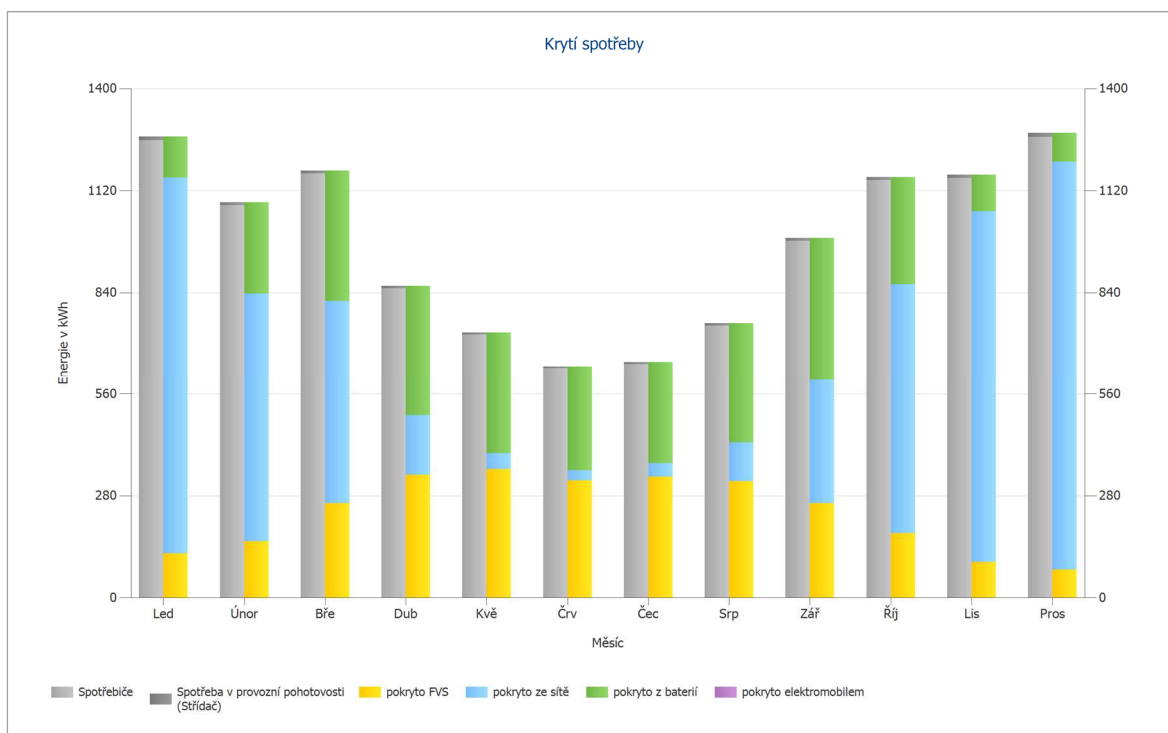
Zde je zajímavý výsledek, že téměř polovinu uvažovaného ročního nájezdu elektromobilu cca 21 000 km připojeného do modelové FVE lze pokrýt lokálně vyrobenou elektřinou z FVE. Toto je samozřejmě velmi zjednodušený výpočet, který uvažuje pouze domácí nabíjení a rovnoměrně rozložený nájezd elektromobilu během roku.



Graf 1: Toky energie



Graf 2: Využití solární energie



Graf 3: Krytí spotřeby

Z výsledků simulace je patrný očekávaný výsledek. V letních měsících výroba výrazně převyšuje spotřebu domu a značná část vyrobené elektřiny je dodávána do sítě, případně by musela být mařena omezováním výkonu solární elektrárny měničem.

Naopak v zimních měsících, především v prosinci a v lednu je třeba převážnou většinu elektřiny dodávat ze sítě. Hlavním cílem navrhované řízení akumulace je alespoň částečně omezit množství elektřiny dodávané ze sítě především v jarních a podzimních měsících, a naopak lépe využít nadbytek vyrobené elektřiny v letních měsících. V zimních měsících z důvodu nedostatečné výroby je vliv řízené akumulace velmi malý.

## 2.5 Vliv řízení a akumulace na zvýšení využití přebytků FVE

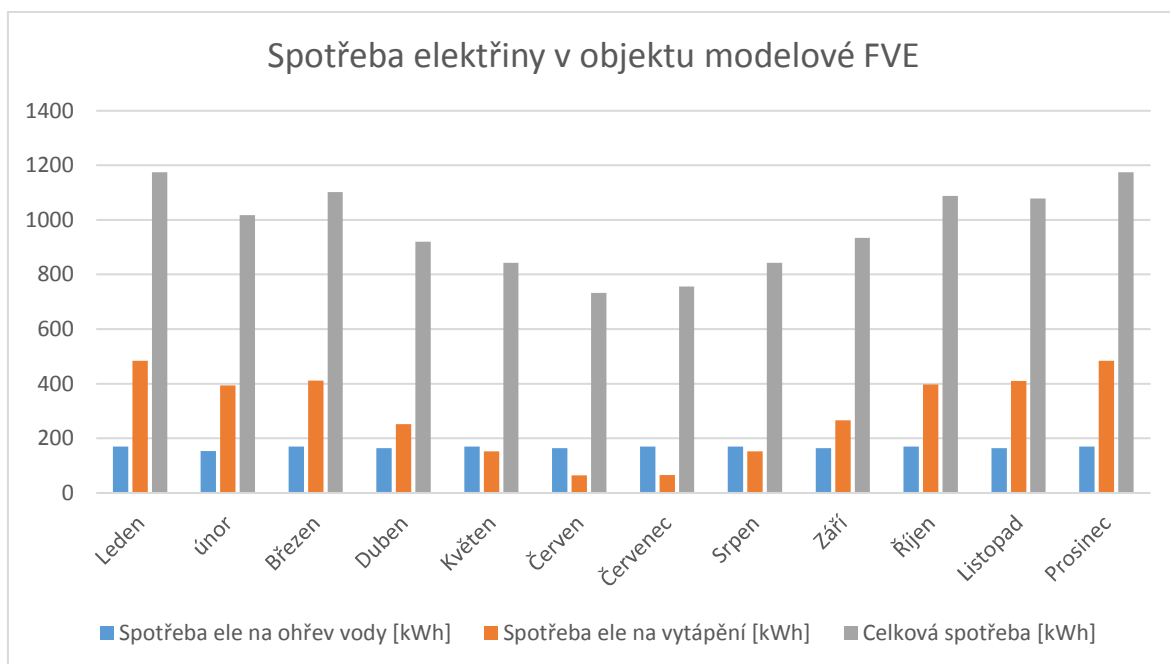
V této kapitole se pokusím pomocí řízeného spínání akumulačních spotřebičů dosáhnout zvýšeného využití elektřiny vyrobené FVE v daném objektu.

Zjevné využití přebytků elektřiny vyrobené FVE je na akumulační ohřev vody a na akumulační vytápění. Na grafu Graf 2 výše jsou modrou barvou označeny přebytky výroby FVE, které nejsou spotřebovány v objektu a odtékají do sítě.

Spotřeba elektřiny na akumulační vytápění a akumulační ohřev vody a celková měsíční a denní spotřeba v jednotlivých měsících pro modelovou FVE vypadá následovně:

Měsíc	Spotřeba ele na ohřev vody [kWh]	Spotřeba ele na vytápění [kWh]	Celková měsíční spotřeba [kWh]	Průměrná denní spotřeba [kWh]
Leden	170	483	1174	38
únor	153	393	1017	36
Březen	170	411	1102	36
Duben	164	252	920	31
Květen	170	152	843	27
Červen	164	65	733	24
Červenec	170	66	756	24
Srpen	170	152	843	27
Září	164	266	934	31
Říjen	170	397	1087	35
Listopad	164	410	1078	36
Prosinec	170	483	1174	38
SUMA	<b>2000</b>	<b>3533</b>	<b>11661</b>	

Tab. 4: Spotřeba elektřiny akumulární a celková



Graf 4: Spotřeba elektřiny v objektu modelové FVE

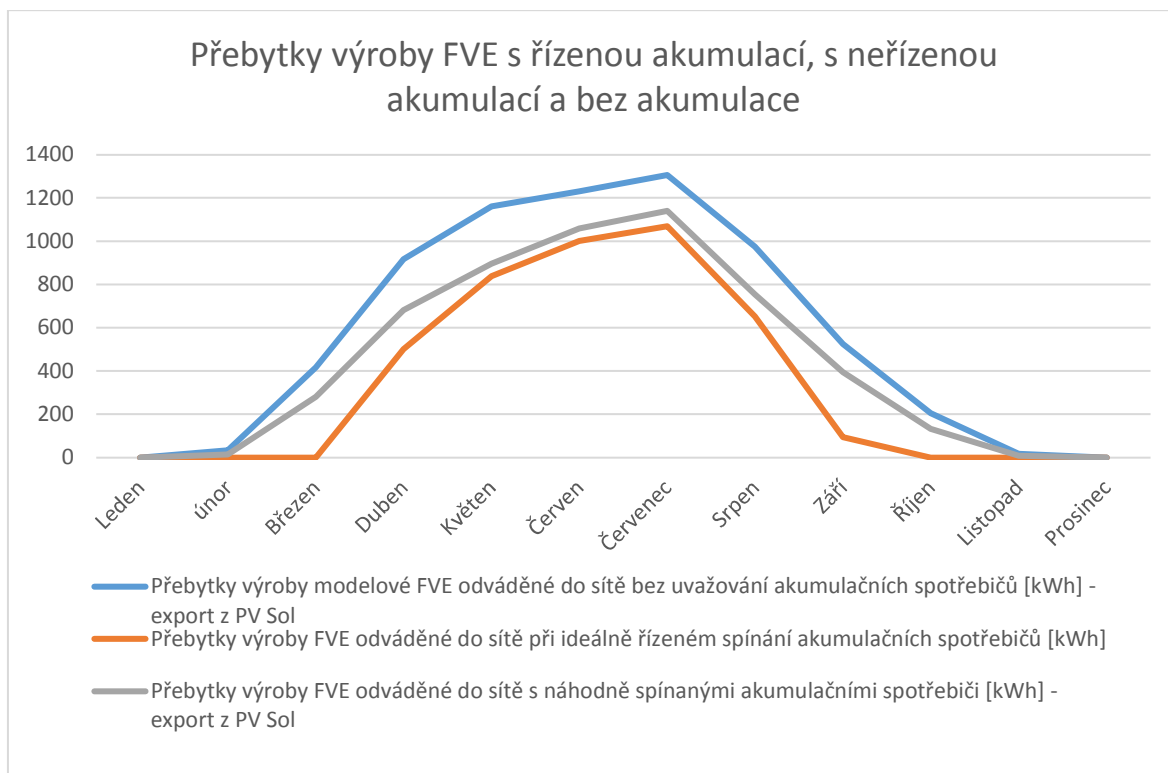
Z Tab. 4 a grafu Graf 4 je patrné, že průměrná denní spotřeba v prosinci a v lednu je cca o 55% vyšší než v červenci a v srpnu. To odpovídá požadavkům na vytápění v zimě a je bohužel v přímém protikladu k množství přebytků FVE, které jsou největší v létě. Toto je největší omezení fotovoltaických elektráren.

Z Tab. 4 také zřejmé, že akumulační prvky spotřeby, tedy akumulační ohřev vody a vytápění tvoří dohromady cca 47,5% celkové spotřeby objektu. To je velmi významná část, která je využitelná k maximalizaci vlastní spotřeby objektu.

Přebytky výroby FVE s řízenou akumulací, s neřízenou akumulací a bez akumulace jsou vidět v následující tabulce:

Měsíc	Přebytky výroby FVE odváděné do sítě bez uvažování akumulačních spotřebičů [kWh] - export z PV Sol	Přebytky elektřiny využitelné na napájení aku. spotřebičů [kWh]	Přebytky výroby FVE odváděné do sítě při ideálně řízeném spínání aku. spotřebičů [kWh]	Přebytky výroby FVE odváděné do sítě při neřízeném spínání aku. spotřebičů [kWh] - export z PV Sol
Leden	0	0	0	0
únor	33	33	0	14
Březen	416	416	0	281
Duben	917	416	500	681
Květen	1161	322	839	895
Červen	1230	229	1001	1059
Červenec	1306	236	1070	1140
Srpen	974	322	651	753
Září	524	431	94	394
Říjen	204	204	0	132
Listopad	17	17	0	8
Prosinec	0	0	0	0
<b>SUMA</b>	<b>6780</b>	<b>2626</b>	<b>4155</b>	<b>5357</b>

Tab. 5: Přebytky výroby FVE s řízenou akumulací, s neřízenou akumulací a bez akumulace.



Graf 5: Přebytky výroby FVE s řízenou akumulací, s neřízenou akumulací a bez akumulace

Z Tab. 5 a Graf 5 lze dovodit, že pokud bychom neuvažovali žádnou akumulční složku spotřeby (například ohřev vody a vytápění plynem nebo tuhými palivy), pak by daná FVE dodávala do sítě 6780 kWh ročně, což odpovídá cca 48 % vyrobené elektřiny. Pokud pro tutéž modelovou FVE a tutéž modelovou spotřebu domu budeme uvažovat instalaci elektrického akumulčního ohřevu vody a elektrického akumulčního vytápění, které bude spínáno bez ohledu na aktuální přetoky, pak přetoky do sítě klesnou na 5357 kWh. Pokud bychom navíc byli schopni plně využít potenciál přebytků pro napájení akumulčních spotřebičů, tak by přetoky do sítě dále klesly na 4155 kWh ročně. Celkové přetoky do sítě by tak klesly z 48 % na 29 % elektřiny vyrobené v modelové FVE. Pokud bychom porovnávali stav s řízenými a neřízenými akumulčními elektrickými spotřebiči, tak přetoky do sítě poklesnou z 38 % na 29 %.

Je nutno vzít v potaz limity toho výpočtu dané tím, že spotřeba akumulčních spotřebičů a přebytky FVE jsou průměrovány po měsících a je uvažováno maximální možné využití přebytků. Proto je třeba mít dostatečně velké akumulční nádrže na vodu v řádech nižších jednotek m<sup>3</sup> (tomu odpovídají nižší stovky kWh kapacity). Tyto akumulční nádrže jsou běžně dostupné a cenově výhodné. Reálně dosažitelné využití přebytků FVE na napájení akumulčních spotřebičů se tak bude blížit ideální vypočítané hodnotě.

Je také zřejmé, že od listopadu do února je limitem omezená produkce FVE, a tudíž význam akumulace nad rámec standardního elektrochemického akumulátoru je velmi omezený.

Naopak v jarních a podzimních měsících je význam řízené akumulace velmi výrazný. Od cca května do září má modelová FVE výrazné přebytky, které nezbyvá než odvádět do sítě. Snížení přebytků by bylo možné dosáhnout, pokud bychom uvažovali výrazné spotřebiče používané převážně v letních měsících – klimatizaci, případně ohřev bazénu, které zde nejsou uvažovány. Ohřev bazénu má navíc výraznou akumulaci složku. Avšak nutno dodat, že toto jsou spíše zbytné spotřebiče. Z mého pohledu by bylo nejvhodnější odvádět přetoky do sítě, kde by v letních měsících v návaznosti na přebytky elektřiny v síti, které se projeví nízkou až zápornou cenou elektřiny na spotovém trhu, byly spouštěny elektrolyzéry pro výrobu vodíku. Vodík by mohl být využíván pro těžkou nákladní, případně lodní a leteckou dopravu a v zimních měsících na vytápění a špičkovací výrobu elektřiny v době, kdy je nedostatek elektřiny z obnovitelných zdrojů.

### 3 Návrh hardware řídicí jednotky

Abych mohl v praxi ověřit použití externího ŘS pro řízení FVE a otestovat některé vybrané algoritmy ŘS popsané v kapitole 4, sestavil jsem modelovou FVE s akumulací a s řízením spotřeby. Specifikace této FVE je uvedena v kapitole 5.

#### 3.1 Výběr hardware a jeho limity

##### 3.1.1 Mikrokontrolery

Jako řídicí systém by bylo možné použít komerčně dostupné mikrokontrolery od výrobců Microchip, Texas Instruments a řady dalších. Tyto mikrokontrolery na jednom integrovaném čipu obsahují nejenom mikroprocesor, ale také paměť a jednotlivé vstupy a výstupy. Je možné vybírat z velkého množství různých typů a většinou je možné je pořídit jako součást počítačové desky od stejného výrobce. Tato deska obsahuje prvky pro napájení, komunikaci a pro připojení vstupů, výstupů a dalších periférií. Také je vždy od výrobce k dispozici programovací prostředí. Tyto desky zpracovávají vstupy pomocí naprogramované logiky a aktivují odpovídající výstupy. Velkou výhodou je nízká cena, jednoduché programovací prostředí dostupnost řady knihoven a rozšiřujících modulů. Nevýhodou je nedostatečný výpočetní výkon a paměť, které omezují použití těchto přístrojů v náročnějších průmyslových aplikacích. Pro model ŘS navržený v této práci by však tyto mikrokontrolery byly zcela dostačující.

##### 3.1.2 Programovatelné logické automaty

Programovatelný logický automat (PLC) je průmyslový počítač používaný pro automatizaci procesů v reálném čase. Většinou se jedná o řízení průmyslových provozů. Já jsem měl možnost si zapůjčit na katedře KEI FEL ZČU. PLC ART4000 SW od české firmy AMIT. Tento řídicí systém se programuje v prostředí zvaném DetStudio vyvíjeném také firmou AMIT. Následně pro vizualizaci a ovládání je použit SCADA systém Promotic od firmy Microsys s.r.o. Výhodou PLC je jeho robustnost, výpočetní výkon, škálovatelnost a relativně jednoduchá možnost vizualizace a ovládání procesu pomocí nadřazeného SCADA systému. SCADA systém je software, který umožňuje monitorování, řízení a zobrazování nejrůznějších technologických procesů [16]. Nevýhodou pro moji aplikaci je především cena PLC a fakt, že pro vizualizaci a ovládání procesu pomocí SCADA systému Promotic s počtem proměnných vyšších než 30 nebo s počtem obrazovek vyšším než 10 je



nutné platit pravidelné měsíční poplatky výrobcí. Základní technické parametry zvoleného PLC AMIT ART4000 SW jsou uvedeny v kapitole 5.2.5

### 3.1.3 Na míru navržený HW řídicího systému

Pokud by se jednalo o komerční řešení, bylo by z mého pohledu nejvhodnější navrhnout ŘS na míru pro dané použití s potřebným množstvím vstupů, výstupů a komunikací přesně dle potřeb dané aplikace. Toto je však nad rámec aktuálních schopností autora a rozsahu diplomové práce.

Pokud by měl ŘS navíc být schopen zpracovávat data o aktuální spotové ceně elektřiny, o předpovědi počasí a predikovat výrobu, tak tyto výpočetní úkony by musely být provedeny na samostatném PC mimo ŘS a přes komunikační linku sdílet vybrané výstupy do ŘS.

## 3.2 Vstupy a výstupy ŘS modelové FVE

### 3.2.1 Analogové vstupy 0 až 5 V

- Teplota v domě
- Teplota vody na výstupu z akumulární nádoby topné vody
- Napětí na akumulátoru
- Proud akumulátoru
- Proud v místě připojení na rozvodnou síť

### 3.2.2 Digitální výstupy 24 VDC

- Sepnutí stykače pro napájení topné spirály zásobníku topné vody pro vytápění
- Sepnutí stykače pro napájení topné spirály boileru na ohřev teplé vody

Pro komplexní monitorování toků energie a preciznější řízení by bylo v budoucnu vhodné doplnit další vstupy a výstupy.

## 3.3 Komunikace

### 3.3.1 Sériová komunikace RS232 a RS485

Zvolený PLC AMIT ART4000 SW i wattrouter umožňují komunikaci pomocí rozhraní RS232 i RS485. PLC navíc umožňuje komunikaci pomocí CAN.

Já jsem pro komunikaci mezi PC a oběma zařízeními použil rozhraní RS232. Jedná se o sériový komunikační standard navržený pro komunikaci výhradně mezi dvěma zařízeními,

rychlostí do 20kbit/s a na vzdálenost max 10 až 15 metrů [17]. Jeho výhodou je především jednoduchost a cena. Dříve bylo toto rozhraní hojně používané pro propojení PC s periferiemi, dnes už bylo téměř zcela nahrazeno USB. Bylo tedy nutné použít převodník RS232-USB.

Pro komunikaci mezi PLC a wattrouterem jsem použil rozhraní RS485 s protokolem Modbus. Toto umožňuje řídicímu systému dále pracovat s parametry měřenými wattrouterem, popřípadě je zobrazovat v uživatelském rozhraní na obrazovce PC. Výhodou rozhraní RS485 oproti RS232 je vyšší přenosová rychlost až 10Mbit/s, vyšší odolnost proti rušení, možnost komunikace až do vzdálenosti 1,2 km a možnost připojení až 32 zařízení [17].

### **3.3.2 Komunikace v počítačové síti**

PLC i wattrouter jsou schopny komunikovat v počítačových sítích s technologií Ethernet, což lze využít především pro možnost vzdáleného přístupu do obou zařízení přes internet.

Připojení wattrouteru do počítačové sítě je možné zajistit pomocí převodníku z RS232/ RS485 na TCP/IP. Monitorovací PC program wattrouteru umožňuje nastavení komunikace zadáním IP adresy a použitého portu daného převodníku.

PLC lze připojit do počítačové sítě obdobně pomocí externího převodníku od firmy AMIT z RS232/ RS485 na TCP/IP. V programovacím prostředí DetStudio je nutné nastavit parametry komunikace v záložce Projekt – Nastavení – Komunikace. Vhodnější řešení by bylo použít PLC, které je již výstupem na Ethernet vybaveno, jako je například AMIT AMiNi 4DW2. Toto PLC však nebylo možné pro moji práci zapůjčit z katedry KEI FEL ZČU. Toto PLC má i webový server pro základní vizualizaci a ovládání přes internet, který je však schopen obsloužit pouze jeden webový klient v daném čase.

Případně by také bylo možné připojit wattrouter i PLC na společnou sběrnici RS484 s využitím protokolu Modbus RTU jako Slave a systém Promotic na ovládacím PC nastavit jako Master. Přístup na Ethernet by byl zajištěn přes PC. Nevýhodou by byla potřeba trvalého zapnutí ovládacího PC.

Moje modelová FVE k datu odevzdání diplomové práce není připojena do počítačové sítě Ethernet z důvodu nedostupnosti potřebného HW.

## 4 Návrh algoritmu řídicího systému FVE

V této kapitole jsou stručně popsány dostupné algoritmy pro řízení spotřeby elektřiny produkované FVE a dále mnou navržené další algoritmy, kterými je možné zlepšit monitorování FVE a spotřeby, umožnit uživatelské nastavení spotřebičů a zvýšit využití elektřiny v místě výroby. Vybrané algoritmy jsou zjednodušeně zobrazeny v příloze [3].

### 4.1 Dostupné metody regulace spotřeby

Zde popsaný řídicí systém řeší především FVE instalované na střechách residenčních nemovitostí. Řídicí systém má za cíl optimalizovat aktuální spotřebu domu s využitím běžně dostupných metod regulace spotřeby elektřiny v místě instalace residenční FVE a dále tyto možnosti vylepšuje dalšími funkcemi. Jelikož systém má za cíl řídit nejenom spínání vybraných spotřebičů, ale také jejich odpojování a uživatelské nastavení s cílem optimalizovat energetickou bilanci domu, jedná se fakticky spíše o ŘS energetické bilance domu nežli pouze o ŘS FVE.

Mezi stávající běžně dostupné metody regulace spotřeby patří hromadné dálkové ovládání a regulace wattrouterem.

### 4.2 Hromadné dálkové ovládání

Hromadné dálkové ovládání (HDO) je metoda regulace spotřeby elektřiny odebírané ze sítě, kdy na základě požadavků přenosové soustavy jsou pomocí spouštěcího signálu spínány spotřebiče pracující v tzv. nízkém tarifu. Signál HDO je v ČR vysílán z rozvodu 110/22 kV a je superponován na základní frekvenci v rozvodné síti. V síti u konečných odběratelů je instalováno velké množství přijímačů tohoto signálu, které na jeho základě spouští vybrané spotřebiče. Většinou se jedná o akumulární spotřebiče, jako jsou boilers nebo akumulární kamna.

### 4.3 Wattrouter

Wattrouter naopak reguluje spotřebu tak, aby se minimalizovaly přetoky elektřiny do rozvodné sítě v době, kdy FVE vyrábí více elektřiny, než je aktuální spotřeba objektu.

Pokud wattrouter identifikuje přetoky do sítě, ihned spíná předvolené akumulární spotřebiče, které dané přetoky eliminují. Spínání spotřebičů probíhá pomocí polovodičových relé (SSR), které umožňují rychlé pulsní spínání tak, že přidaná spotřeba přesně odpovídá aktuálnímu přebytku vyrobené elektřiny. Těchto relé může být více. Jakmile je jedno SSR

trvale sepnuté/rozepnuté, regulátor připojí / odpojí další stupeň regulace [14] a začne pulsně regulovat další SSR. Toto probíhá do té doby, než je na měřeném místě mezi odběratelem a sítí žádaná hodnota elektrického proudu (většinou nulová). Pokud regulátor vyčerpá všechny stupně regulace, aniž by dosáhl žádané hodnoty, tak zbylý proud přetéká do sítě / je odebírán ze sítě. Takto lze regulovat především odporové akumulční spotřebiče, ale dnes existují i teplená čerpadla a wallboxy pro nabíjení elektromobilů s vlastní plynulou regulací, která lze pulsně napájet [14].

#### 4.4 Akumulační spotřebiče

Aby mohl ŘS efektivně řídit spotřebu, je třeba mít k dispozici dostatečnou akumulční složku spotřeby. V zimních měsících je značný podíl celkové spotřeby domu dán vytápěním, takže je možné s výhodou elektrickou energii ukládat ve formě tepla do vody (boilery akumulční nádrže) nebo přímo do materiálu domu (ideálně betonové nebo zděné nosné konstrukce pro svoji vysokou hustotu). Především voda má ideální vlastnosti pro ukládání tepelné energie díky svojí relativně vysoké hustotě, a především bezkonkurenční měrné tepelné kapacitě. Ohřevem 1 m<sup>3</sup> vody o 10°C spotřebujeme 11,6 kWh energie. Elektrickou energii lze měnit na užitečné teplo s prakticky 100 % účinností. Vzhledem k tomu, že v boileru můžeme vodu v zimě ohřát klidně o 60°C (v závislosti na otopné soustavě a tepelných ztrátách domu), tak lze relativně levně získat kapacitu „tepelné baterie“ v řádech desítek až stovek kWh. To je cenově bezkonkurenční oproti klasickému elektrochemickému akumulátoru. Výraznou nevýhodou samozřejmě je, že tuto energii lze využít pouze na ohřev vody nebo vytápění.

Jako tepelnou baterii je také možné využít samotný dům, pokud je postaven z materiálu s dostatečnou hustotou. Běžný jednopodlažní rodinný dům z vápenopískových cihel bez započtení hmotnosti neizolovaných částí domu (především základy) s celkovou hmotností 100 až 150 tun spotřebuje na ohřev domu o 1°C cca 25 až 40 kWh energie. Získáváme tak další desítky kWh v tepelné baterii tvořené samotným domem, pokud jsou obyvatelé ochotni akceptovat fluktuaci vnitřní teploty o jednotky stupňů. Velká teplená baterie může výrazně pomoci využití elektřiny z FVE v podzimních a jarních měsících. Například modelová FVE dle kapitoly 2 vyrobí během jednoho slunečního podzimního dne cca 40 až 60 kWh elektřiny, což je výrazně více než jsou dnes dostupné kapacity elektrochemických domovních akumulátorů především z hlediska ceny. Cca od poloviny listopadu do cca poloviny února jsou bohužel zisky z FVE tak malé, že limitem se stává množství vyrobené elektřiny a ani velká tepelná baterie nepomůže.

Naopak v letních měsících, kdy je výroba z fotovoltaických panelů největší, potřebujeme tepelnou energii většinou pouze na ohřev boileru. Pro zvýšení lokálního využití elektřiny z FVE v letních měsících je nutné použít elektrochemický akumulátor a především zajistit dostatečné množství řízených spotřebičů – ohřev bazénu, klimatizace, elektromobil.

## **4.5 Popis algoritmů řídicího systému**

### **4.5.1 Výhody řídicího systému**

Výhody použití samostatného řídicího systému nad rámec běžně dostupných metod regulace spotřebičů jsou následující.

- Vizualizace a uživatelské nastavení významných spotřebičů a FVE v jednom uceleném prostředí
- Možnost vzdáleného přístupu a nastavování uživatelských parametrů přes internet
- Mírné zvýšení množství spotřebované elektřiny z FVE v místě výroby a odpovídající snížení přetoků do sítě
- Snížení potřebné kapacity jističe
- Možnost řízeného prodeje elektřiny do sítě

Tyto výhody jsou detailněji popsány v následujících kapitolách.

### **4.5.2 Vizualizace a uživatelské nastavení významných spotřebičů a FVE v jednom uceleném prostředí**

Systém měří vybrané elektrické parametry výroby elektřin z FVE a její spotřeby v domě a vizualizuje je na displeji. Mezi zobrazované elektrické parametry patří: výkony/ příkony všech zdrojů a spotřebičů, proudy a napětí v důležitých uzlech, barevně označené aktuální toky energie, stav nabití akumulátoru.

Mezi neelektrické parametry patří především aktuální teplota v boileru a v akumulární nádrži a v domě. Lze nastavovat požadovanou teplotu v domě a v boileru a její hysterezi.

Možnost zvolení předvolených programů provozu domu:

- AUTOMATIKA – Základní nastavení provozu, wattrouter spíná spotřebiče dle svého algoritmu (viz kapitola 4.3) a ŘS nastavuje požadované teploty, hysterezi a podle toho spíná / odpojuje přívod elektřiny k daným spotřebičům
- EKO – Automatické zvýšení požadované teploty v domě při přebytku výroby z FVE v zimních měsících (sepne vytápění) a sepnutí předvoleného spotřebiče

nebo prodej elektřiny do sítě v letních měsících, snížení minimální teploty v akumulční nádrži při nedostatku elektřiny z FVE

- DOVOLENÁ – je automaticky zrušeno fixní nastavení požadované teploty v domě a v akumulčních nádržích, prioritní napájení akumulčních nádob z přebytků výroby z FVE až do bezpečného limitu, pokud jsou přebytky výroby vyšší, tak se přebytečná elektřina použije na vytápění/chlazení domu/ prodej elektřiny do sítě. Naopak při nedostatku výroby se plynule mění požadovaná hodnota teploty v domě a v akumulčních nádržích až k minimálním bezpečným hodnotám.

Vybrané algoritmy jsou principiálně zobrazeny v příloze [3]

#### **4.5.3 Možnost vzdáleného přístupu a nastavování uživatelských parametrů přes internet**

Pomocí vzdáleného přístupu do řídicího systému přes internet je možné monitorovat aktuální parametry výroby a spotřeby v domě a měnit nastavení ovládaných zařízení dle potřeby – například zvýšení teploty v domě před příjezdem z dovolené. Konkrétní možnosti přístupu do mnou zvoleného řídicího systému jsou uvedeny v kapitole 3.3.2. V modelové FVE však přístup přes internet nebyl realizován z důvodu nedostupnosti potřebného HW.

#### **4.5.4 Mírné zvýšení množství spotřebované elektřiny z FVE v místě výroby a odpovídající snížení přetoků do sítě**

Přetoky do sítě jsou často nežádoucí, protože zvyšují nároky na přenosovou soustavu a na regulaci výkonu klasických zdrojů elektřiny. Pokud to distributor povolí, je již možné na území ČR přebytečnou elektřinu posílat do sítě a prodávat obchodníkovi s elektřinou za fixní nebo spotovou cenu. Případně je možné využít služeb tzv. virtuálních baterií, kdy přebytečnou elektřinu dodáváme do sítě a pak ji za zvýhodněnou cenu zpět nakupujeme v době potřeby. Možností je mnoho, je však třeba dodat, že vždy je technicky i ekonomicky nejvýhodnější maximum vyrobené elektřiny spotřebovat v místě výroby.

Možnosti uvedené v kapitole 4.5.2, režim EKO a režim DOVOLENÁ umožňují mírně zvýšit využití elektřiny v místě spotřeby nad rámec dnes standardně využívaných možností. Může to však být na úkor komfortu a je na uživateli do jaké míry si nastaví limity.

Dalšího mírného zvýšení vlastní spotřeby elektřiny je možné dosáhnout, pokud bude mít ŘS schopnost zpracovávat data o předpokládaném slunečním svitu a podle toho predikovat výrobu elektřiny z FVE na jednotky dní dopředu. Následně je možné podle toho upravovat

parametry celého energetického systému domu. Například by bylo možné zabránit sepnutí akumulčních spotřebičů v brzkých ranních hodinách signálem HDO ve dnech, kdy je predikována vysoká výroba elektřiny z FVE. Případně, pokud je do systému připojen elektromobil se schopností „Vehicle to Grid“ (V2G) je teoreticky možné podle predikce výroby, spotřeby a minimální požadované úrovně nabití elektromobilu použít k regulaci i část kapacity akumulátoru elektromobilu.

#### 4.5.5 Omezení velikosti hlavního jističe

ŘS je možné také využít pro snížení potřebné velikosti hlavního domovního Běžně se postupuje tak, že maximální povolený proud jističem odpovídá součtu příkonu všech zařízení v domě, případně s využitím koeficientu soudobosti spotřebičů. Může se však stát, že navržená velikost jističe má velmi vysokou hodnotu, která bude reálně využita pouze velmi omezenou dobu, ale uživatel musí takto platit vysoké měsíční poplatky za rezervovaný příkon. Potřebnou velikost jističe je možné snížit tak, že pokud ŘS vyhodnotí, že proud jističem se blíží k limitní hodnotě, tak odepne jednotlivé akumulční spotřebiče podle nastavených priorit. Tento stav může například nastat při zapnutí sauny nebo jiného velkého neřízeného spotřebiče, který je však provozován omezenou dobu.

Algoritmus je zjednodušeně zobrazen v příloze [3].

#### 4.5.6 Možnost řízeného prodeje elektřiny do sítě

Data o spotových cenách elektřiny na příštích 24 hodin jsou veřejně dostupná. ŘS může tato data zpracovávat a podle nich upravovat spotřebu akumulčních spotřebičů. Pokud má uživatel sjednanou smlouvu o prodeji elektřiny do sítě za spotové ceny a pokud nastane stav, že je výhodné místo ukládání přebytečné elektřiny do akumulčních spotřebičů tuto elektřinu prodávat, pak to systém vyhodnotí a podle toho upraví priority spínání spotřebičů. Toto by ve svém důsledku mohlo uživateli nejenom zrychlit návratnost investice, ale také při výrazném rozšíření této technologie na stovky tisíc residenčních FVE s akumulací pomoci vyrovnávat proměnné zatížení sítě. Je však nutno dodat, že nelze předpokládat, že by tento stav nastával často, protože pokud jsou k dispozici přebytky z FVE, je pravděpodobné, že bude dostatek zdrojů v rozvodné síti, takže spotová cena elektřiny bude nízká. Vzhledem k velmi rozsáhlé propojené evropské síti je však možné, že budou nastávat období, kdy je v dané lokalitě jasno, a tedy přebytky výroby, a současně je vysoká poptávka po elektřině. Reálný potenciál tohoto řešení by bylo vhodné ověřit porovnáním historických spotových

cen elektřiny v jednotlivých dnech v roce s množstvím slunečního záření dopadajícího na vybrané lokality v těchto dnech.

Při dostatečné kapacitě domovního akumulátoru, případně pomocí V2G je možné si představit, že by systém umožňoval také rezervovat část kapacity akumulátorů pro služby primární regulace frekvence. Avšak jedná se z hlediska sítě o tak zanedbatelné výkony, že zatím je to v našich podmínkách pouze teoretická představa. Přesto už ve světě existují pilotní projekty virtuálních baterií, které koordinovaným řízením mnoha decentralizovaných akumulčních zdrojů plní podpůrné služby pro síť [15].

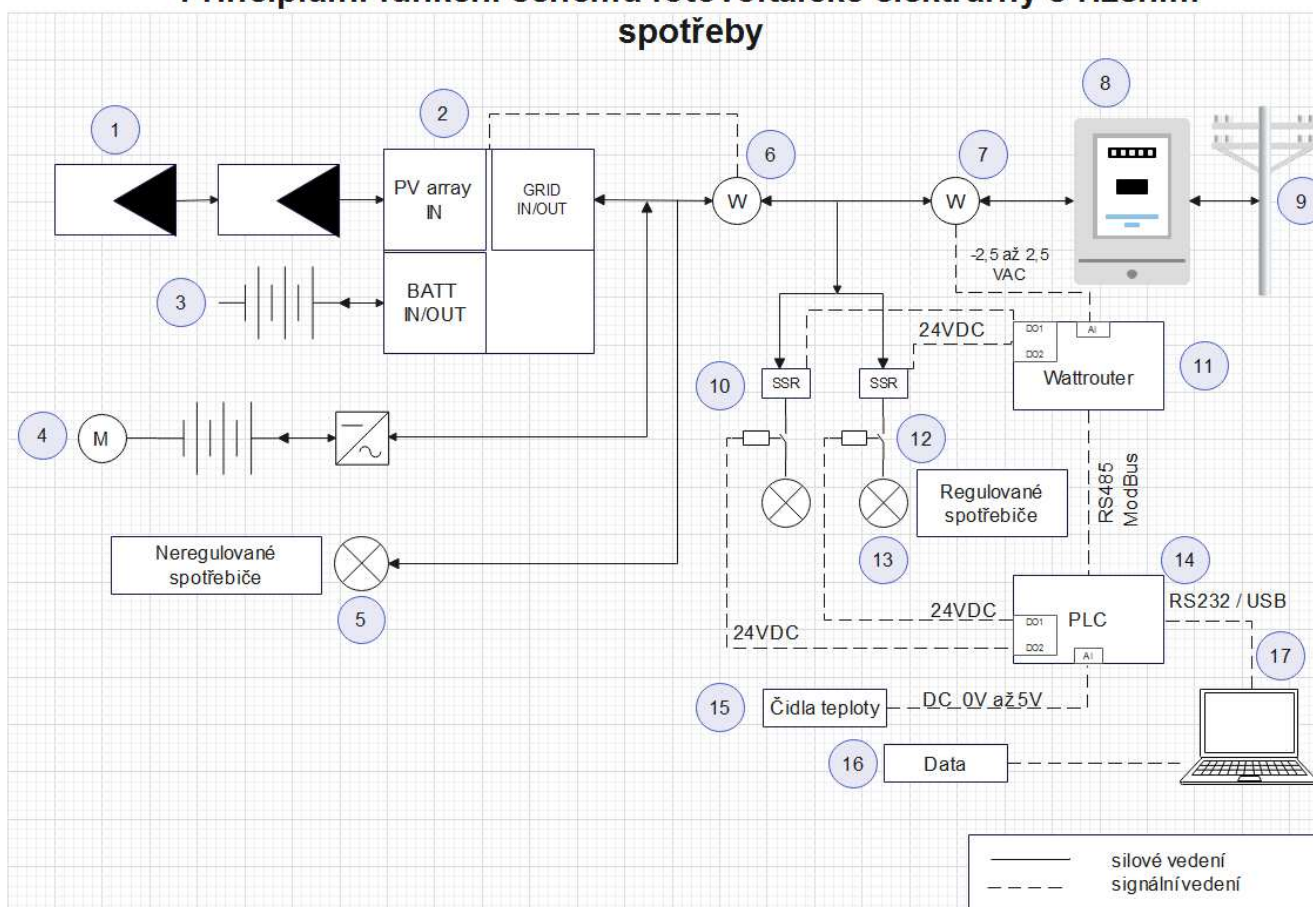
Algoritmus řízeného prodeje elektřiny do sítě je zjednodušeně zobrazen v příloze [3]



## 5 Modelová FVE pro ověření funkce základních algoritmů ŘS

Modelová FVE popsaná v této kapitole, kterou jsem navrhl a sestavil v rámci diplomové práce, je výrazně menší, než FVE navržená v kapitole 2. Zatímco FVE navržená v kapitole 2 má být v budoucnu reálně postavena a návrh sloužil k ověření využití a výnosů dané FVE, tak modelová FVE popsaná v této kapitole slouží především pro ověření možnosti řízení toků elektřiny a vybraných algoritmů.

### Principiální funkční schéma fotovoltaické elektrárny s řízením spotřeby

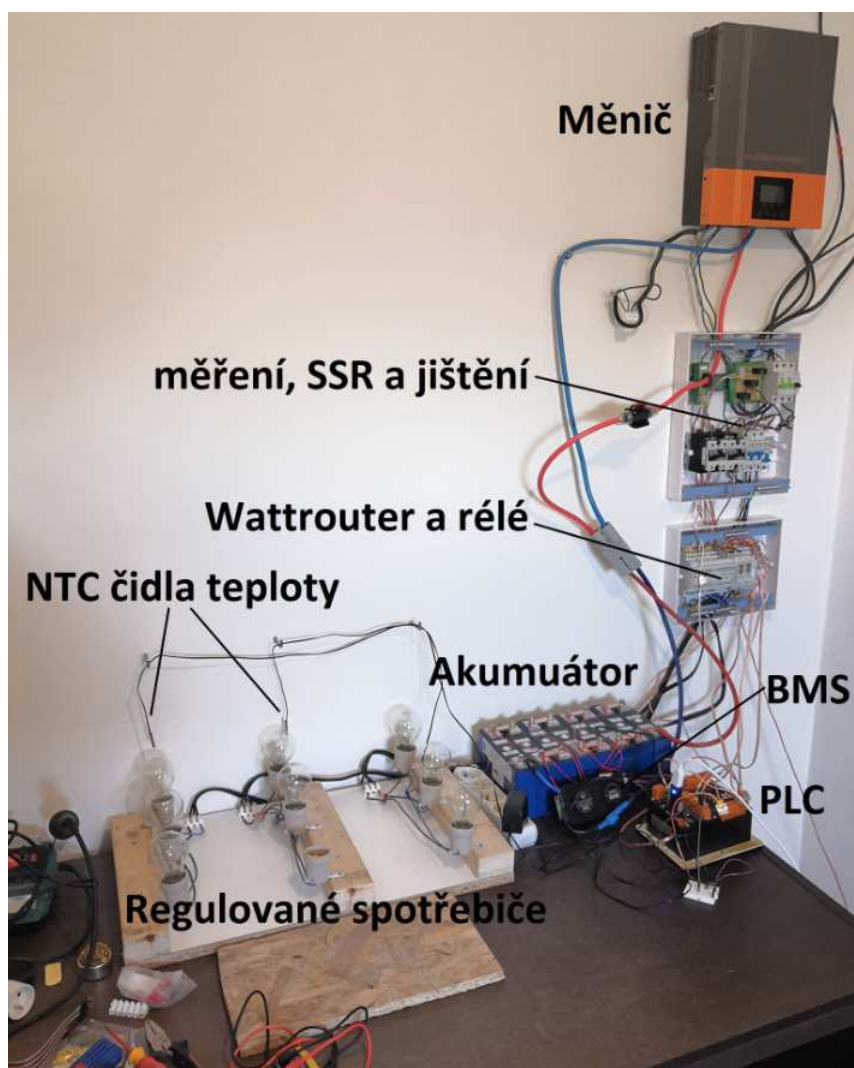


Obr. 9: Principiální funkční schéma FVE s řízením spotřeby

#### Legenda:

- 1 – fotovoltaické panely
- 2 – hybridní solární měnič
- 3 – domovní akumulátor
- 4 – elektromobil (není součástí modelové elektrárny)
- 5 – neregulované spotřebiče (běžné spotřebiče v domácnosti)
- 6 – wattmetr solárního měniče
- 7 – wattmetr wattrouteru

- 8 – hlavní domovní elektroměr a HDO přijímač
- 9 – rozvodná síť
- 10 – Polovodičové relé SSR spínané signálem 24VDC z wattrouteru
- 11 – wattrouter
- 12 – relé spínané z PLC signálem 24VDC
- 13 – regulované akumulační spotřebiče – v modelu FVE jsou 2, obecně jich může být výrazně více
- 14 – řídicí jednotka PLC
- 15 – čidla teploty (měření teploty napojené na analogové vstupy 0 až 5V PLC)
- 16 – data (není použito v modelu FVE, zakresleno pro případ přidání funkcionality predikce výroby)
- 17 – počítač pro programování PLC a uživatelské rozhraní



Obr. 10: Sestavená modelová FVE

### 5.1 Princip fungování modelové FVE

FVP vyrábí elektřinu. Měnič vyrobenou elektřinou napájí veškeré neregulované spotřebiče č.5 a současně vyhodnocuje směr toku energie procházející wattmetrem č.6. Pokud je směr toku energie od FVE do sítě, tzn. činná složka výkonu na wattmetru č.6 je

záporná, pak měnič spustí nabíjení akumulátoru 3 tak, aby vyrovnal tok energie do sítě na nulovou hodnotu. Když je akumulátor plně nabitý nebo pokud její BMS nepovolí dostatečně veliký nabíjecí proud, pak přebytečná energie odchází do sítě. Reálně se ale ještě nejedná o skutečné přetoky do sítě, protože mezi hlavním elektroměrem č.8 a wattmetrem č.6 se nachází odbočka pro napájení regulovaných akumulčních spotřebičů č.13. Wattrouter č.11 vyhodnocuje směr toku energie wattmetrem č.7 a pomocí polovodičových relé č. 10 spíná regulované akumulční spotřebiče č.13. Řídicí systém č.14 sbírá data z wattrouteru č.11 a z čidel č.15, zobrazuje je a spíná relé č.12 podle měřených hodnot a uživatelského nastavení.

## 5.2 Technická specifikace modelové FVE

Základní technické parametry jsou uvedeny v následující tabulce. V dalších odstavcích jsou detailněji popsány jednotlivé prvky modelové FVE.

Poloha	Plzeň, Jižní předměstí
Typ elektrárny	S akumulčním systémem v ostrovním provozu*
Instalovaný výkon	0,9 kWp
Plocha fotovoltaických panelů (FVP)	2,2 m <sup>2</sup>
Umístění panelů	Rovná střecha
Orientace panelů	Jihozápad, sklon panelů 15°

\* Měnič je ostrovní, ale modelová FVE představuje síťovou verzi viz více v kapitole 5.2.2.

### 5.2.1 FVP

FV moduly	2 x LR4-72HPH-450M
Výrobce	Longi Solar
Výkon panelu	450 Wp
Rozměry	2094 x 1038 x 35
Účinnost	20,7%
Orientace	jihozápad
Napětí panelu v pracovním bodě MPP dle STC	41,5 V
Proud panelu v pracovním bodě MPP STC	10,85 A



Obr. 11: Instalované fotovoltaické panely

### 5.2.2 Měnič

Model	PowMr Hybrid Solar Inverter 3kW 24V
Výrobce	PowMr
Typ	Hybridní, ostrovní (Off grid)
Počet	1
Konfigurace MPPT	1 x 2
Maximální výkon solárních panelů	3000 W
Napětí baterie (DC coupled)	24V
Max nabíjecí proud	80 A
Účinnost	94%
AC napětí	230 V, 50/60Hz
AC výkon	3,2 kVA

Aby bylo možné řídit akumulční spotřebiče podle přetoků do sítě, bylo nutné sestavit model FVE s připojením k síti. Faktické připojení k síti bez souhlasu distributora je však zakázané, a navíc hybridní měniče umožňující připojení na síť jsou výrazně dražší než ostrovní měniče. Proto jsem zvolil variantu ostrovního měniče, kde místo přetoků do sítě používám „přetoky“ do odporové zátěže (3 klasické žárovky 100 W). Toto s sebou bohužel přináší omezení při provozu modelové FVE. Systém se vždy nachází ve stavu, že vyrobené elektřiny je buď příliš, a pak měnič dobíjí akumulátor a následně automaticky omezí výrobu, nebo ve stavu, že vyrobené elektřiny je nedostatek, a pak měnič propojí zátěž s akumulátorem, dokud nedojde k vybití akumulátoru. Následně by následovalo odpojení veškerého AC odběru. Systému bohužel takto chybí jeden stupeň volnosti daný právě přetoky do sítě. Pro samotné zkoušení algoritmů wattrouteru a PLC toto naštěstí příliš

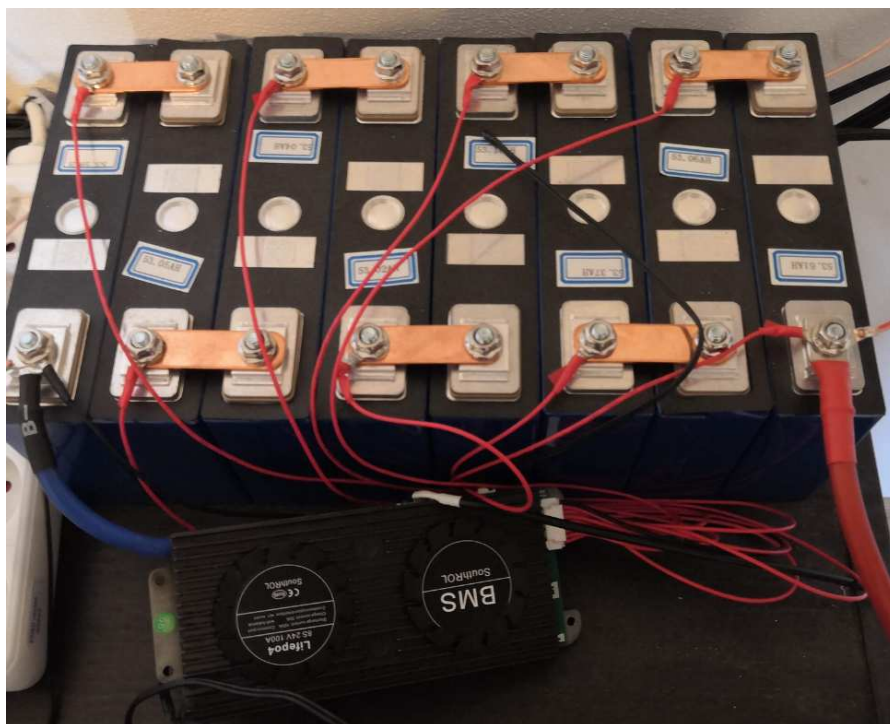


nevadí, protože wattrouter ani PLC s měničem FVE přímo nekomunikují a věnují se pouze využití přetoků. Na wattrouteru lze ručně zvýšit nebo snížit žádanou hodnotu přetoku proudu do rozvodné sítě, vzhledem pevně danému proudu do „rozvodné sítě“ simulované odporovou zátěží. Takto lze zkoušet jak chování systému při přebytku výroby FVE nad aktuální spotřebou objektu, tak naopak při nedostatečné výrobě FVE vzhledem k aktuální spotřebě. Vzhledem k nedostupnému hybridnímu měniči a aby bylo možné provádět testování ŘS a spínání SSR nezávisle na aktuálním slunečním svitu, zpracoval jsem v rámci ŘS jednoduchou simulaci modelové FVE.

### 5.2.3 Akumulátor

Model	N/A – sestaveno autorem
Počet	1
Výrobce článků	Yinlong
Typ článků	LiFePO4, 50 Ah, 3,2V
Počet článků	8
Uspořádání článků	Sériové
Jmenovité napětí akumulátoru	25,6 V
Typ připojení	DC připojení
Jmenovitý výkon nabíjecí / vybíjecí	1,28 / 6,4 kW
Jmenovitý vybíjecí proud	250 A
Jmenovitý nabíjecí proud	50 A
BMS	Smart BMS 3S-24S-100A
Ochrany	Přílišné nabití, přílišné vybití, zkrat, teplota
Aktivní balancér článků	ANO

Použil jsem běžně dostupné LFP akumulátorové články. Z výroby dorazily plně nabitě. Pro získání maximální možné kapacity jsem provedl vybalancování článků jejich paralelním propojením a vyčláním 48 hodin pro naprosté vyrovnání napětí na všech článcích v nabitém stavu. Články jsem zapojil sériově pro získání nominálního napětí akumulátoru 25,2 V, které umožňuje připojení na zvolený měnič. K akumulátoru jsem také připojil BMS, který zajišťuje potřebnou ochranu všech článků proti nadměrnému nabití, nadměrnému vybití, zkratu a nadměrné teplotě.



Obr. 12: LFP akumulátor a BMS

#### 5.2.4 Wattrouter

Model	GBO-Aku
Počet	1
Výrobce	Yorix s.r.o.
Napájecí napětí	230V 50Hz
Analogové vstupy	3 x -2,5 až +2,5V DC 2 x 0 až 5V DC
Digitální vstupy	1 x 0/5V
Digitální výstupy	6 x 5V/20mA pro spínání externí SSR
Releové výstupy	5 x 230V AC/5A pro připojení zátěže
Rozměry v [mm]	105 x 95 x 59

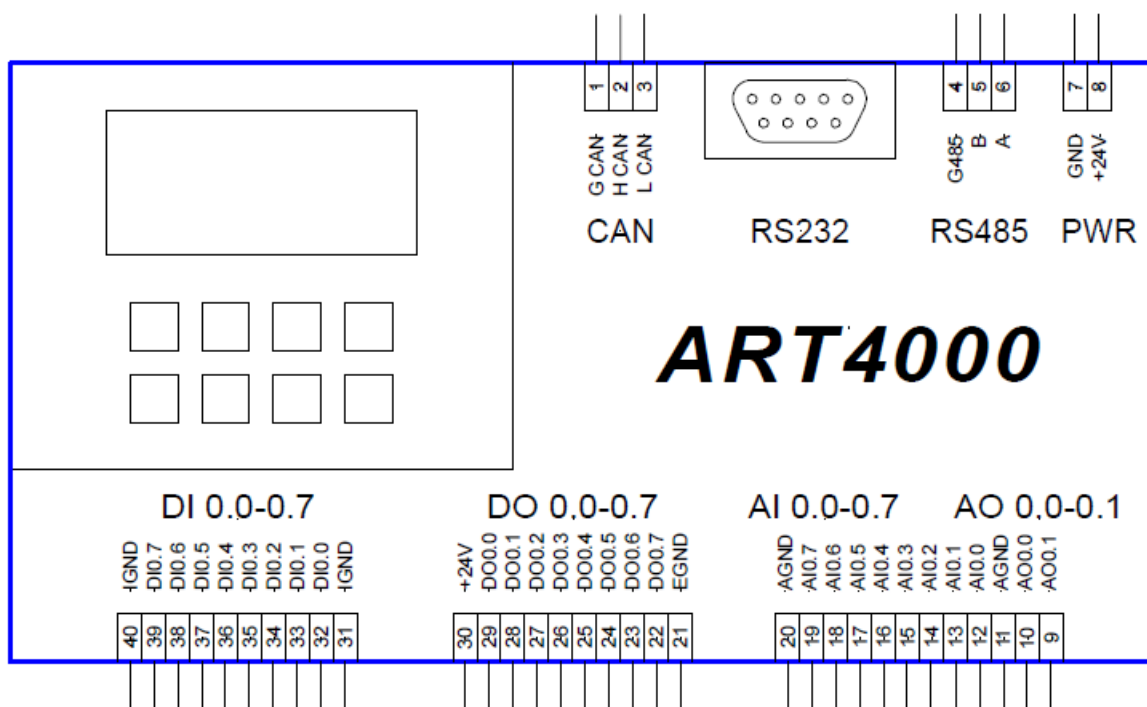
Popis funkce wattrouteru je uveden v kapitole 4.3. Každý výstup může ovládat 2 SSR, může tak pulsně spínat i třífázový spotřebič.

#### 5.2.5 Řídicí systém

Pro spínání akumulčních spotřebičů podle nastavených teplot pro a sběr dat pro vizualizaci jsem použil PLC ART4000 SW od české firmy AMIT. Základní parametry jsou uvedeny v následující tabulce:

Výrobce	AMIT
Model	ART4000 SW
Číslicové vstupy	Univerzální střídavý / stejnosměrný

	8 × 24 V ss/st Logická 0 min .0 V, max 5 V Logická 1 min 16 V, max 30 V
Číslicové výstupy	8 × 24 V / 0,5 A ss
Analogové vstupy	8 × 0..10 V/0..5 V/0..20 mA/Ni1000
Analogové výstupy	2 × 0..10 V, zatížení maximálně 10 mA
Sériový komunikační kanál	RS232 (CANON 9), RS485 (WAGO231-303) CAN (WAGO231-303)
Displej LCD	podsvětlený, 4 × 20 znaků, kurzor VFD zelený, 4 × 20 znaků, kurzor
Klávesnice	Membránová s 27 tlačítky
Krytí - přední panel . - zadní panel	IP55 IP20
Rozměry ART4000A (. × v × h)	146 × 166 × 87 mm
Hmotnost	1 kg
Zálohování	5 let
Programování	PSP3 (NOS), jazyk C (AC166)



Obr. 13: Schématické označení PLC AMIT ART4000 SW

Na svorky 7 a 8 dle Obr. 13 je přivedeno napájení přístroje. Konektor RS232 jsem použil pro propojení s PC. Konektor RS485 jsem použil pro propojení s wattrouterem pomocí protokolu Modbus. Na svorky 12 až 16 (AI01 až AI04) jsou připojeny analogové vstupy viz detailně v kapitole 5.2.8. Jejich společná zem je přivedena na svorku 20 AGND. Na svorky 28 a 29 (DO0.0 a DO0.1) jsou připojeny digitální výstupy pro ovládání relé akumulárních

spotřebičů (pozice 12 na Obr. 9). Společná zem všech DO je vyvedena na svorku 21 EGND. Napájení 24VDC všech DO je přivedeno na svorku 30.

### 5.2.6 Polovodičové relé

Pro pulsní spínání řízených akumulčních spotřebičů na základě přebytků vyrobené elektřiny jsem použil dvě polovodičová relé RM1A48D50 od firmy Carlo Gavazzi. SSR přijímá řídicí signál z wattrouteru, který je opticky přenášen na součástky nazývané fototriaky, které spínají zátěž. Velkou výhodou SSR je, že neobsahují pohyblivé díly, a tudíž zvládají velmi vysoké spínací frekvence, aniž by podléhaly výraznějšímu opotřebením. Základní parametry jsou uvedeny v následující tabulce:

Výrobce	Carlo Gavazzi
Model	RM1A48D50
Nominální proud	50 A
Nominální napětí	480 V
Regulační napětí	4 až 32 VDC
Spínací režim	Spínání v nule

Pro moji aplikaci není vývin tepla tak velký, aby bylo nutné používat chladič. Pro spínání výkonů v řádku kW už ale je vývin tepla značný a je nutné použít odpovídající chladič. Na kontaktní plochu mezi SSR a chladičem je nutné nanést tepelně vodivou pastu. Rozměry chladiče závisí na velikosti spínaného proudu a okolní teplotě.

S použitím SSR v případě spínání větších výkonů souvisí nebezpečí vzniku elektromagnetického rušení a flickeru. Spínání v nule má výhodu, že je zátěž je spínána po celých sinusových periodách, tudíž nevzniká SS složka proudu ani vysokofrekvenční rušení. Nevýhodou při rychlém spínání větších zátěží je náchylnost ke vzniku lokálních fluktuací napětí, které mohou způsobit blikání osvětlení (flicker).

Naproti tomu okamžité spínání SSR v kombinaci s fázovým řízením SSR (zde nepoužito) omezuje vznik flickeru, protože nedochází ke snížení napětí na nulu v průběhu celé periody, ale naopak generuje vysokofrekvenční rušení, protože deformuje původně sinusový odběr proudu [14].

### 5.2.7 Elektromagnetická relé

Pro spínání řízených akumulční spotřebičů na základě rozdílu mezi požadovanou a měřenou teplotou jsem použil 2 relé od VS116K od firmy Elko, které lze spínat napětím 24 VDC z číslicových výstupů PLC.



### 5.2.8 Měření

- *Měření proudu akumulátoru* – vodič kladného pólu akumulátoru je provlečen feritovým pouzdem a vytváří v něm magnetický tok úměrný velikosti proudu. Hallova sonda snímá tento tok a převádí jej na napětí úměrné protékajícímu proudu. Sensor je napájen 5 V DC, výstupem ze sensoru je napětí 0 až 5 V a je připojen na PLC svorku AI0.4.
- *Měření napětí akumulátoru* – rozsah měřeného napětí je 0 až 60 V, výstupní napětí ze sensoru je 0 až 5 V. Pokud by akumulátor měl vyšší napětí než 60 V, je nutné připojit předřadný odpor odpovídající hodnoty. Čidlo je připojeno na PLC svorku AI0.2.
- *Měření proudu na rozhraní síť/objekt* – sensor slouží pro 3f měření AC proudu, ale je možné zapojit pouze jednu fázi. Prodává se jako příslušenství wattrouteru od stejného výrobce. Průvlakem měřicího transformátoru se provleče kabel s měřeným proudem, který vytváří v jádru měřicího transformátoru střídavý magnetický tok, který na vinutí měřicího transformátoru indukuje střídavé napětí úměrné procházejícímu střídavému proudu. Toto napětí v rozsahu  $-2\text{ V}$  až  $+2\text{ V}$  je snímáno na odporu a je dále připojeno na AD převodník, který je součástí wattrouteru.
- *Měření teploty* – Jedná se o dvě čidla – jedno simuluje měření teploty v domě a druhé měření teploty v boileru. Čidla jsou připojena na PLC svorky AI0.0 a AI0.1. Především z důvodu příznivé ceny byla použita čidla NTC, která na základě teploty mění svůj odpor. Rozsah měřených teplot je  $-30$  až  $125\text{ }^{\circ}\text{C}$ , což pro tuto aplikace s rezervou dostačuje. Čidlo se zapojí v sérii s předřadným odporem  $10\text{ k}\Omega$  a připojí se na napětí  $5\text{ V}$ . Z takto vzniklého napěťového děliče snímáme napětí, které je úměrné teplotě. Závislost napětí na teplotě je silně nelineární. Byla provedena kalibrace čidla tak, že pro několik různých teplot bylo odečteno napětí na výstupu z čidla. Takto vzniklou závislost napětí na teplotě je možné zanást do tabulky a zadat do PLC AMIT pomocí příkazu „Interpol“.

### 5.2.9 Regulované spotřebiče

Regulované spotřebiče jsou jednoduše nahrazeny klasickými žárovkami  $100\text{ W}$ . Každý ze dvou regulovaných spotřebičů modelují tři paralelně zapojené žárovky. Lze tedy každý spotřebič regulovat v rozsahu  $0$  až  $300\text{ W}$ . Výhodou je jednak nízká cena a jednak to, že pulsní spínání zátěže je okamžitě znát díky blikajícím žárovkám. Model regulovaných

spotřebičů ji vidět na Obr. 10. Je třeba dodat, že takto pulsně regulované spotřebiče musí být odporového charakteru, tedy především elektrotepelné spotřebiče – topné spirály boilerů a jiných akumulčních zásobníků, přímotopy, případně odporové topné kabely podlahového vytápění. Zátěž s induktivní nebo kapacitní složkou, případně napájení jakéhokoliv zařízení s integrovanou elektronikou (tepelné čerpadlo, elektromobil) takto pulsně nelze regulovat. Odběry externích zařízení s vlastní elektronikou jako jsou tepelná čerpadla a wallboxy však lze regulovat tak, že mezi wattrouter a dané zařízení se vloží převodník 0 až 10 V DC, a samotné zařízení si pomocí svojí elektroniky na základě tohoto signálu pulsně řídí příkon [14]. Je samozřejmě nutné vybrat takové externí zařízení, které je vybaveno odpovídajícím řízením a řídicím vstupem.

### 5.2.10 Umístění v rozvaděči

Základní prvky v rozvaděči FVE jsou označeny na Obr. 14 níže – I BAT – měření proudu akumulátoru, I SÍŤ – měření proudu na rozhraní síť / objekt, SSR – polovodičová relé, U BAT – měření napětí akumulátoru.



Obr. 14: Umístění zařízení v rozvaděči

### 5.3 Zpracování vybraných algoritmů pro řízení modelové FVE

Pro modelovou FVE jsem navrhl jednoduchý algoritmus. Principiální funkční schéma FVE s řízením spotřeby je zobrazeno na Obr. 9. Pro snazší popis jsou jednotlivá zařízení označena čísly. Algoritmus pulsního spínání regulovaných akumulčních spotřebičů zajišťuje wattrouter č.11 Popis algoritmu wattrouteru je uveden v kapitole 4.3. ŘS navíc umožňuje vizualizaci dat a odpojování / připojování spotřebičů regulovaných spotřebičů. Algoritmus ŘS na základě porovnání skutečné a žádané hodnoty teploty z analogových vstupů č.15 sepne nebo rozepne dané relé č.12 regulovaných spotřebičů č.13. Žádanou teplotu a hysterezi může nastavit uživatel. V režimu EKO ŘS pracuje s požadovanými teplotami v boileru a v objektu tak, aby byla umožněna větší schopnost akumulace tepla za cenu větší fluktuace teploty v místnosti a teploty teplé vody. Uživatelské nastavení, vizualizace dat a programování PLC probíhá pomocí počítače č. 17.

#### 5.3.1 Program řídicího systému

Aplikace pro PLC AMIT ART4000 SW se vytváří v prostředí DetStudio. Program je zdarma ke stažení. Jelikož nemám k dispozici síťový měnič a vzhledem k požadavku na možnost testování ŘS bez ohledu na aktuální výrobu elektřiny z modelové FVE (viz omezení popsána v kapitole 5.2.2), tak naprogramovaná aplikace samotnou výrobu z FVE a akumulaci modeluje pomocí jednoduchých rovnic. Naopak aplikace řídí spínání reálných spotřebičů, komunikuje s wattrouterem, používá reálná čidla teploty. Cílem je ověřit možnosti vizualizace a řízení spotřeby elektřiny z modelové FVE.

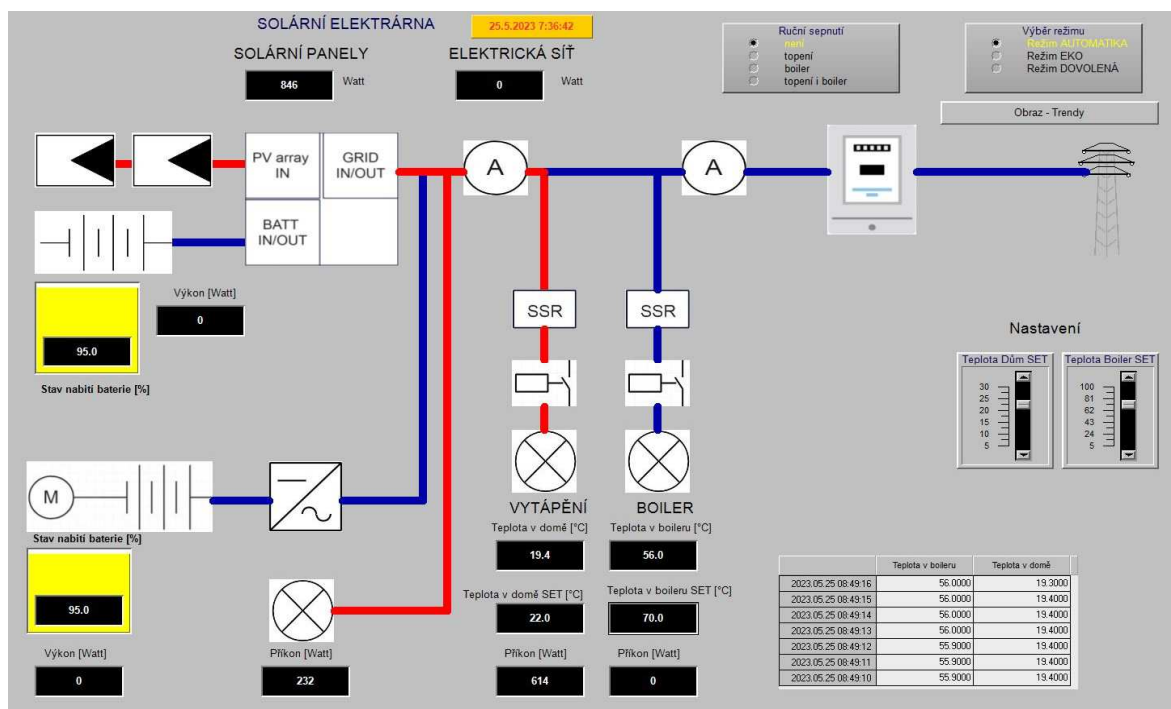
Program vedle domovního akumulátoru modeluje také elektromobil. Pokud je přebytek vyrobené elektřiny, tak se nejprve nabíjí domovní akumulátor. Když hodnota jejího nabití stoupne nad 95 %, tak se začne nabíjet elektromobil. Pokud jsou oba akumulátory nabité a je současně přebytek vyrobené elektřiny, tak přebytečný výkon je automaticky pomocí wattrouteru a SSR odváděn do regulovaných. Program umožňuje automatický nebo ruční režim. V automatickém režimu, pokud je měřená teplota v definovaném rozsahu v okolí žádané teploty, tak jsou dané regulované spotřebiče napájeny (sepnuté relé), pokud se teplota dostane mimo žádaný rozsah, tak je daný spotřebič odpojen (rozepnuté relé) a přebytečná elektřina odchází do sítě. Žádanou teplotu a rozsah lze uživatelsky nastavovat. Kdykoliv je také možné ručně sepnout akumulční spotřebiče. Bez ohledu na přebytek nebo nedostatek vyrobené elektřiny vždy mají prioritu neregulované spotřebiče, u kterých je vždy zajištěno napájení – buď z FVE, nebo ze sítě.

Pokud je vyrobené elektřiny nedostatek, tak se nejprve odpojí regulované akumulární spotřebiče. Pokud je stále nedostatek vyrobené elektřiny, tak se spotřeba domu nejdříve pokrývá z domovního akumulátoru, následně pak do předvoleného stavu nabití z akumulátoru elektromobilu.

### 5.3.2 Program pro vizualizaci a uživatelské nastavení FVE

Uživatelské nastavení a vizualizace měřených a parametrů FVE probíhá v prostředí SCADA systému Promotic od firmy Microsys. Samotnou logiku řídicího systému vykonává PLC. Prostedí Promotic pouze umožňuje komunikaci s PLC, což je především zadávání požadavků a grafické zobrazování výstupů.

Uživatelská obrazovka zobrazuje aktuální příkony jednotlivých spotřebičů, výkon FVE a výkon dodávaný ze sítě. Dále jsou červenou barvou vyznačeny části obvodu, kudy aktuálně teče proud. Modrou barvou jsou vyznačeny části obvodu, kde proud neteče. Výškou žlutého sloupce je také zobrazen aktuální stav nabití akumulátorů v rozsahu 0 až 100 %. Posuvnými panely nebo zadáním do okna zobrazujícího nastavenou teplotu lze zadávat požadovanou teplotu v místnosti a v boileru. Tlačítkem „Obraz – Trendy“ lze také graficky zobrazovat trendy teploty v domě v závislosti na čase. Tlačítkem „Změnit režim“ je možné vybrat ze 3 předvolených režimů – Automatický režim, režim EKO, a režim Dovolená. V kterémkoliv režimu lze také ručně kdykoliv zapnout regulované spotřebiče bez ohledu na aktuální výkon FVE. Vybrané obrazovky jsou k dispozici v příloze [5].



Obr. 15: Obrazovka pro ovládání a vizualizaci FVE (prostředí Promotic)

## 6 Závěr

V rámci diplomové práce jsem se v úvodu pokusil vysvětlit, proč z mého pohledu je solární energie jedním z nejperspektivnějších zdrojů pro přechod na udržitelnou výrobu elektřiny. V kapitole 1 jsem shrnul základní teoretické poznatky, konstrukční a technologické aspekty výroby FVP.

V kapitole 2 jsem navrhl fotovoltaickou elektrárnu s akumulací bez řízení spotřeby v programu PV Sol. Následně jsem k tomuto návrhu doplnil v kapitole 2.5 řízení akumulačních spotřebičů a porovnal využití elektřiny vyrobené danou FVE v místě výroby s řízením versus bez řízení. Výsledky jsou vizualizovány v Graf 5. Řízením akumulačních spotřebičů je možné celkové přetoky do sítě pro danou FVE snížit z 38 % na 29 % vyrobené elektřiny. V následujících kapitolách 3 až 5 jsem popsal mnou sestavený model FVE včetně HW a SW pro řízení spotřeby. Navržené řešení obsahuje nad rámec běžně dostupného wattrouteru také PLC počítač, který umožňuje dodatečné funkce – především uživatelské nastavení různých režimů a parametrů a vizualizaci toků elektřiny s využitím SCADA systému Promotic. V sestaveném modelu FVE bylo by vhodné nahradit použitý ostrovní měnič měničem hybridním síťovým, aby bylo možné reálně FVE připojit k síti. Toto však nebylo možné provést nejen díky vysoké pořizovací ceně potřebného hybridního měniče, ale i z hlediska dlouhé průběžné doby pro získání povolení k připojení k síti. Pak by bylo možné na tomto modelu třeba v průběhu celého roku testovat vliv řízení spotřebičů na využití vyrobené elektřiny a toto porovnat se simulací v programu PV Sol.

Za přínos méj práce považuji analýzu a kvantifikaci vlivu současných možností řízení spotřeby elektřiny z FVE a návrh dodatečných řešení pro doplnění dalších funkcí a zvýšení uživatelského komfortu.

Bylo by zajímavé dokončit zde navržená řešení do finálního produktu, který by bylo možné komercializovat. Bylo by pro to nutné dopracovat řídicí algoritmus, řešit zálohu dat, zabezpečení, exporty dat a řadu dalších okolností. Také by bylo z mého pohledu vhodné pro řídicí systém navrhnout na míru HW a uživatelské rozhraní místo použití PLC a komerčního SCADA systému především z hlediska pořizovací ceny PLC a pravidelných plateb za SCADA systém. Dále by bylo vhodné do ŘS integrovat další funkce popsané v kapitole 4.5. Zvláště zajímavým dalším krokem by mohlo být ověření přínosu a popřípadě doplnění řízeného prodeje elektřiny do sítě popsaného v kapitole 4.5.6 na základě predikce výroby, spotřeby a znalosti spotových cen elektřiny.

## Literatura

- [1] Statista, Net electricity consumption worldwide in selected years from 1980 to 2021 [online], © Statista 2023 [vid 2023-02-12], dostupné z: <https://www.statista.com/statistics/280704/world-power-consumption/>
- [2] Internation Energy Agency, Global Energy Review 2021 [online], © CC licence OECD, 2023, [vid 2023-02-12], dostupné z: <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2021/renewables>
- [3] Internation Institute of Sustainable Development, Decoding Net-Zero Pledges to Meet Paris Agreement Goals, SDG 7 [online], 2021-10-27, [vid 2023-02-16], dostupné z: <https://sdg.iisd.org/commentary/policy-briefs/decoding-net-zero-pledges-to-meet-paris-agreement-goals-sdg-7/>
- [4] Libra Martin, Poulek Vladislav, Fotovoltaika, Teorie i praxe využití solární energie, Česká zemědělská univerzita v Praze, ISLA, 2009
- [5] Benchmark Mineral Intelligence, Gigafactory Assessment [online], © BMI 2023, [vid 2023-02-25], dostupné z: <https://www.benchmarkminerals.com/market-assessments/gigafactory-assessment/>
- [6] Internation Energy Agency, Grid Scale Storage [online], © CC licence OECD, 2023, [vid 2023-02-25], dostupné z: <https://www.iea.org/reports/grid-scale-storage>
- [7] Haselhuhn Ralf, Fotovoltaika – Budovy jako zdroj proudu, Ostrava, HEL, 2010
- [8] Stacy C. Davis; Susan E. Williams & Robert G. Boundy - Transportation Energy Data Book - vydání 36.2, . Oak Ridge National Laboratory, 2018-08
- [9] Václav Smil: Energie, 2006, Kniha Zlín
- [10] Jason Svarc, Most Efficient Solar Panels 2023 [online], 2023-02, [vid 2023-03-25] dostupné z: <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/most-efficient-solar-panels>
- [11] Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems and Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, Photovoltaics-Report [online], 6.12.2022, © Fraunhofer 2023 [vid 2023-03-15], dostupné z: <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf>
- [12] Jarson Svarc, Solar Panel Construction [online], 2020-03-20, [vid 2023-02-23], dostupné z: <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/solar-panel-components-construction>

- [13] NS Energy, Crimson Energy Storage Project [online], © NS Energy 2022 [vid 2023-04-07], dostupné z: <https://www.nsenergybusiness.com/projects/crimson-energy-storage-project/>
- [14] Richard Trochta - Yorix, GBO-Aku [online], 2021-01-19 [vid 2022-10-18], dostupné z: <http://www.yorix.cz/cz/greenbono/gbo-aku.htm>
- [15] Paul Ridden - New Atlas, Battery Virtual Power Plant launches to help with electricity grid stability [online], 2023-02-10, [vid 2023-04-01], dostupné z: <https://newatlas.com/energy/solaredge-battery-virtual-power-plant/>
- [16] Promotic, Co je PROMOTIC [online], © MICROSYS, spol. s.r.o. 2023 [vid 2023-05-03], dostupné z: <https://www.promotic.eu/cz/pmdoc/WhatIsPromotic/WhatIsPromotic.htm>
- [17] Elprocus, Difference Between RS232 and RS485 : Advantages and Disadvantages [online], © Elprocus 2023 [vid 2023-05-17], dostupné z: <https://www.elprocus.com/difference-between-rs232-and-rs485-advantages-and-disadvantages/>

## Přílohy

- [1] Příloha 1\_Simulace Chalupa Abertamy\_18,5 kW 20kWh
- [2] Příloha 2\_Schéma zapojení\_Chalupa Abertamy\_18,5 kW
- [3] Příloha 3\_Algoritmy řídicího systému
- [4] Příloha 4\_Kód programu ŘS modelové FVE
- [5] Příloha 5\_Vybrané obrazovky ŘS modelové FVE
- [6] Příloha 6\_Principiální funkční schéma FVE s řízením spotřeby