



## **Bakalářská práce**

# **Návrh pracoviště pro Laboratoř fotovoltaických systémů**

*Studijní program:*

*Autor práce:*

*Vedoucí práce:*

B0714A270001 Mechatronika

**Ivar Majda**

Ing. Pavel Jandura, Ph.D.

Ústav mechatroniky a technické informatiky

Liberec 2022







## Zadání bakalářské práce

### Návrh pracoviště pro Laboratoř fotovoltaických systémů

|                          |  |
|--------------------------|--|
| <i>Jméno a příjmení:</i> | <b>Ivar Majda</b>                          |
| <i>Osobní číslo:</i>     | M20000125                                  |
| <i>Studijní program:</i> | B0714A270001 Mechatronika                  |
| <i>Zadávací katedra:</i> | Ústav mechatroniky a technické informatiky |
| <i>Akademický rok:</i>   | 2022/2023                                  |

#### Zásady pro vypracování:

1. Proveďte rešerši současného stavu poznání technologií pro fotovoltaické systémy, zaměřte se zejména na problematiku střídačů, výkonových optimizérů a fotovoltaických panelů.
2. Proveďte rešerši moderních trendů a technik řízení fotovoltaických systémů (spolupráce s úložištěm energie, omezení či naopak dodávka přetoků do distribuční sítě) a jejich simulace (simulátory bateriových systémů a polí FV panelů)
3. Navrhněte koncepci minimálně jedné laboratorní úlohy z dané problematiky. Jedním z cílů úlohy bude ověřit energetické toky ve fotovoltaickém systému a účinnost komponent.
4. Pro vybraný koncept úlohy navrhněte experimentální pracoviště a ověřte parametry použitých přístrojů.
5. Vypracujte podrobnou technickou dokumentaci k experimentálnímu pracovišti a návod na měření dané úlohy.

*Rozsah grafických prací:* dle potřeby dokumentace  
*Rozsah pracovní zprávy:* 30-40 stran  
*Forma zpracování práce:* tištěná/elektronická  
*Jazyk práce:* Čeština

### **Seznam odborné literatury:**

- [1] MURTINGER, Karel, Jiří BERANOVSKÝ a Milan TOMEŠ, 2008. *Fotovoltaika: elektřina ze slunce*. 2. vyd. Praha: EkoWATT. 21. století. ISBN 978-80-7366-133-5. KRIPPNER, Roland, ed. *Building-integrated solar technology: architectural design with photovoltaics and solar thermal energy*. Přeložil Susanne HAUGER. Munich: Detail Business Information, 2017. Edition Detail green books. ISBN 978-3-95553-362-5.
- [2] LIBRA, Martin a Vladislav POULEK. *Solární energie: fotovoltaika – perspektivní trend současnosti i blízké budoucnosti*. 2., dopl. vyd. V Praze: ČZU, 2006. ISBN 80-213-1488-5.
- [3] VINOD, Raj KUMAR a S.K. SINGH, 2018. Solar photovoltaic modeling and simulation: As a renewable energy solution. *Energy Reports*. 4, 701-712. ISSN 23524847.  
Dostupné z: doi:10.1016/j.egy.2018.09.008
- [4] ITECH ELECTRONIC CO.,LTD., *How to Test The Photovoltaic Inverter using Solar Array Simulator, SAS1000 Solar Array Simulation Software*

*Vedoucí práce:* Ing. Pavel Jandura, Ph.D.  
Ústav mechatroniky a technické informatiky

*Datum zadání práce:* 12. října 2022  
*Předpokládaný termín odevzdání:* 15. května 2023

prof. Ing. Zdeněk Plíva, Ph.D.  
děkan

L.S.

doc. Ing. Josef Černohorský, Ph.D.  
vedoucí ústavu

## Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má bakalářská práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.



## Poděkování

Chtěl bych vyjádřit své poděkování všem, kteří mi byli nápomocni při realizaci mé bakalářské práce. Nejprve bych chtěl poděkovat vedoucímu mé práce, panu Ing. Pavlu Jandurovi, Ph.D. za jeho cenné rady a čas, který mi věnoval. Rovněž bych chtěl poděkovat své rodině a nejbližším za jejich podporu v průběhu celého studia.



# Návrh pracoviště pro Laboratoř fotovoltaických systémů

## Abstrakt

V první části své bakalářské práce bych rád popsal princip funkce samotné fotovoltaické elektrárny, její možná zapojení v reálné praxi, a co vše by se mělo promítnout do samotného cvičení, které budu zpracovávat. Následně bych se zaměřil na průzkum trhu a popsal možnosti a strategie naložení s vyrobenou energií. Dalším tématem je zapojení a zprovoznění samotných fyzických pracovišť v laboratoři, která se nachází v budově univerzity. Společně s tím vzniknou podrobné návody k samotným úlohám pro budoucí studenty.

**Klíčová slova:** Fotovoltaická elektrárna, fotovoltaický panel, distribuční síť, energie, baterie, měnič

# Workplace design for the Photovoltaic Systems Laboratory

## Abstract

In the first part of my bachelor's thesis, I would like to describe the principle of the function of the photovoltaic power plant itself, its possible involvement in real practice and what should be reflected in the actual exercise that I will be working on. Subsequently, I would focus on market research and describe the possibilities and strategies for handling the produced energy. Another topic is connecting and putting into operation of the physical workplaces themselves in the laboratory, which is located in the university building. Together with this, detailed instructions for the tasks themselves will be created for future students.

**Key words:** Photovoltaic power plant, photovoltaic panel, distribution network, energy, battery, inverter

# Obsah

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Seznam zkratk a výrazů.....</b>                  | <b>13</b> |
| <b>Seznam obrázků .....</b>                         | <b>14</b> |
| <b>Seznam grafů .....</b>                           | <b>15</b> |
| <b>Seznam tabulek.....</b>                          | <b>15</b> |
| <b>Úvod.....</b>                                    | <b>17</b> |
| <b>1 Sluneční záření .....</b>                      | <b>17</b> |
| <b>2 Fotovoltaické elektrárny .....</b>             | <b>18</b> |
| 2.1 FV články .....                                 | 18        |
| 2.1.1 První generace FV článků                      | 19        |
| 2.1.2 Druhá generace FV článků                      | 19        |
| 2.1.3 Třetí generace FV článků                      | 19        |
| 2.1.4 Bifaciální panely                             | 20        |
| 2.1.5 Různá konstrukční provedení FV panelů         | 20        |
| 2.1.6 Parametry FV panelu                           | 21        |
| 2.1.7 Možnosti simulace činnosti FV panelů          | 22        |
| 2.2 Měniče pro fotovoltaiku .....                   | 23        |
| 2.2.1 Mikroměniče                                   | 23        |
| 2.2.2 Měniče použité pro laboratorní úlohy          | 24        |
| 2.3 Měřicí moduly .....                             | 27        |
| 2.4 Výkonové optimalizéry .....                     | 27        |
| 2.4.1 Optimalizéry zvolené do laboratoře            | 28        |
| 2.5 Akumulátory pro fotovoltaické systémy .....     | 29        |
| 2.5.1 Akumulátory použité v laboratoři              | 31        |
| <b>3 Software dostupný na trhu.....</b>             | <b>32</b> |
| 3.1 SW pro návrh FV.....                            | 32        |
| 3.2 SW pro simulaci FV .....                        | 34        |
| <b>4 Možnosti řízení a nakládání s energií.....</b> | <b>36</b> |



|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>5</b> | <b>Měřidla .....</b>                        | <b>37</b> |
| <b>6</b> | <b>Praktická část.....</b>                  | <b>38</b> |
| 6.1      | První úloha .....                           | 38        |
| 6.2      | Druhá úloha.....                            | 41        |
| 6.3      | Měřicí box .....                            | 44        |
| 6.4      | Stojan pro první úlohy.....                 | 46        |
| 6.5      | Třetí úloha .....                           | 47        |
| 6.6      | Výsledná podoba pracoviště pro výuku .....  | 49        |
| <b>7</b> | <b>Závěr .....</b>                          | <b>50</b> |
|          | <b>Použitá literatura .....</b>             | <b>52</b> |
|          | <b>Seznam příloh.....</b>                   | <b>54</b> |
|          | <b>Příloha A: Návod k první úloze .....</b> | <b>55</b> |
|          | <b>Příloha B: Návod ke druhé úloze.....</b> | <b>58</b> |



## Seznam zkratek a výrazů

|          |  |
|----------|--|
| AC       | Alternating Current; střídavý proud                            |
| BMS      | Battery Management System                                      |
| CAN      | Controller Area Network  |
| DC       | Direct Current; stejnosměrný proud                             |
| FF       | Fill Factor; činitel plnění                                    |
| FV       | Fotovoltaika, fotovoltaický                                    |
| LiFePO4  | Lithium–železo–fosfát  |
| MC4      | Multi Contact, 4 mm; konektor pro solární systémy              |
| MPB      | Měřicí a propojovací box                                       |
| MPPT     | Maximum Power Point Tracker; sledování bodu maximálního výkonu |
| Off-grid | Systémy bez připojení k elektrické síti                        |
| On-grid  | Systém připojený k elektrické síti                             |
| PC       | Personal Computer; osobní počítač                              |
| RD       | Rodinný dům  |
| RS232    | Recommended Standard 232; sériový komunikační standard         |
| String   | Řada, řetězec  |
| USB-B    | Universal Serial Bus, Type B                                   |
| UV       | Ultrafialové   |

## Seznam obrázků

|  |    |
|--|----|
| Obrázek 1: Blokové schéma zapojení FV elektrárny [1] .....               | 18 |
| Obrázek 2: Bifaciální solární panel [5] .....                            | 20 |
| Obrázek 3: VA charakteristika FV panelu při různých intenzitách [6]..... | 21 |
| Obrázek 4: DC zdroj řady IT-M3600 [16] .....                             | 22 |
| Obrázek 5: Mikroměnič Enphase IQ 7+ [17].....                            | 24 |
| Obrázek 6: Hybridní měnič GW3648-EM [18] .....                           | 25 |
| Obrázek 7: Měnič SolarEdge SE3500H [19] .....                            | 26 |
| Obrázek 8: Smart meter od společnosti GoodWe [20] .....                  | 27 |
| Obrázek 9: Výkonový optimizér od společnosti SolarEdge [21].....         | 28 |
| Obrázek 10: Baterie Pylontech US2000C [22] .....                         | 31 |
| Obrázek 11: Simulace objektu pomocí SW PV*Sol [23] .....                 | 33 |
| Obrázek 12: Simulace FV panelu v programu SAS1000M [24] .....            | 34 |
| Obrázek 13: Prvotní zapojení první úlohy .....                           | 39 |
| Obrázek 14: Blokové schéma druhé úlohy .....                             | 42 |
| Obrázek 15: Měřicí a propojovací box.....                                | 44 |
| Obrázek 16: Zapojení první úlohy za pomoci MPB .....                     | 45 |
| Obrázek 17: Zapojení druhé úlohy za pomoci MPB .....                     | 45 |
| Obrázek 18: Stojan pro první dvě úlohy .....                             | 46 |
| Obrázek 19: Prvotní měření na vytvořeném stojanu .....                   | 46 |
| Obrázek 20: Monitoring v aplikaci PVMaster .....                         | 47 |
| Obrázek 21: Měřicí box pro třetí úlohu.....                              | 48 |
| Obrázek 22: Blokové schéma třetí úlohy společně s MPB .....              | 48 |
| Obrázek 23: Schéma finální podoby stanoviště v laboratoři.....           | 49 |

## Seznam grafů

|   |    |
|---|----|
| Graf 1: Normovaný test účinnosti měniče ..... | 40 |
|---|----|

## Seznam tabulek

|   |    |
|---|----|
| Tabulka 1: Parametry DC zdroje IT-M3622 [16] .....  | 22 |
| Tabulka 2: Parametry mikroměniče IQ 7+ [17] .....   | 24 |
| Tabulka 3: Parametry měniče GW3648-EM [18] .....    | 25 |
| Tabulka 4: Parametry měniče SE3500H [19] .....      | 26 |
| Tabulka 5: Parametry akumulátoru US2000C [22] ..... | 31 |
| Tabulka 6: Normovaný test účinnosti měniče .....    | 40 |



# Úvod

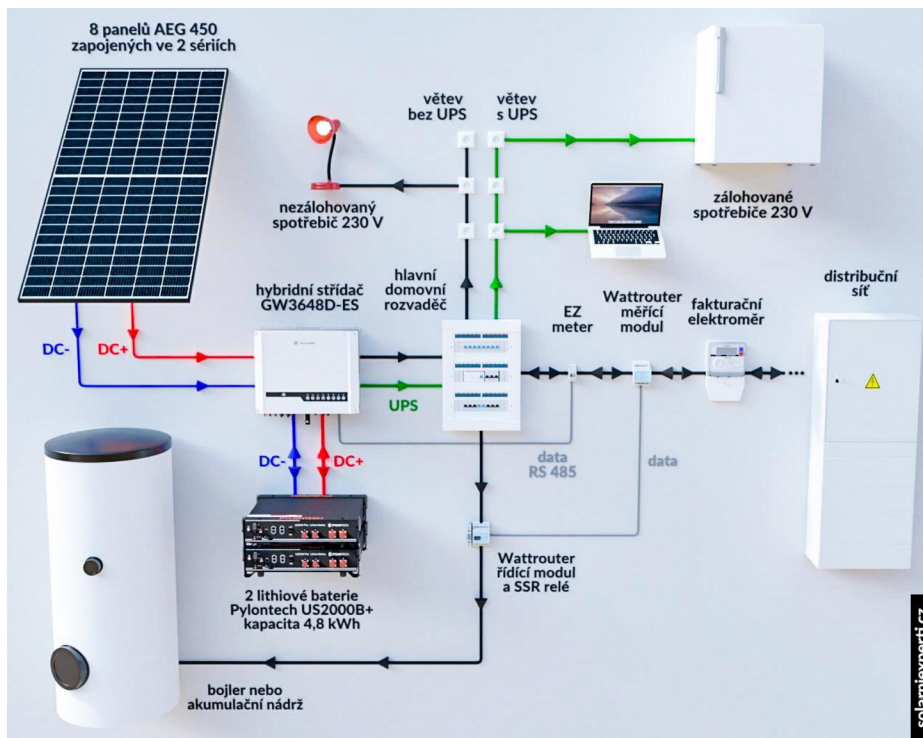
V současné době, kdy naše země zažívá nejen energetickou krizi a celý svět se potýká zároveň i se spoustou ekologických nátlaků a problémů, jako je například vyčerpání neobnovitelných zdrojů, se dostávají na výsluní obnovitelné zdroje energie. Mezi ně patří například vodní, větrná nebo i právě solární energie. Za přednosti zmíněných zdrojů lze považovat hlavně, jak již název naznačuje, jejich obnovitelnost a zároveň i šetrnost k přírodě. Avšak vzhledem k dostupnosti a reálným možnostem vychází jako nejjednodušší a nejvýhodnější variantou právě solární energie. A přesně toto téma bych chtěl ve své práci rozebrat a na základě příkladů a zkušeností z reálného života navrhnout cvičení, jež by si budoucí studenti Univerzity jako součást výuky sami zkusili zapojit a ověřili si tyto poznatky na vlastní kůži. Pro lepší organizaci cvičení, přehlednost a úplnost bude tedy i dalším výstupem mnou vypracované podrobné zadání a návod pro jednotlivé úlohy.

## 1 Sluneční záření

Většina energie, která se u nás na Zemi nachází a využívá, je právě energie sluneční. Ta je nezbytná k většině základních procesů v přírodě jako je například fotosyntéza nebo tvorba vitamínu D v lidském těle. Zdrojem této energie je Slunce. Sluneční energie vzniká díky termodynamickému jevu v jádru Slunce, kde dochází k přeměně částic vodíku na částice helia. Během tohoto jevu dochází k uvolňování velkého kvanta energie. Tato energie následně dopadá na naši planetu ve formě elektromagnetického záření o různých vlnových délkách. Neviditelné ultrafialové záření má vlnovou délku 280–400 nm, zatímco rozsah vlnových délek neviditelného infračerveného záření je 750 nm až 1 mm. Mezi tím se nachází námi pozorovatelné viditelné záření o vlnové délce 400–750 nm. Intenzita a velikost slunečního záření, které dopadne na zemský povrch závisí na vlivech odrazů a pohlcování, se kterými se záření potýká při průchodu atmosférou. Jedním z takových faktorů je například ozonová vrstva. Jedná se o část stratosféry, jejímž úkolem je pohlcovat UV záření, které může mít neblahé účinky na naše zdraví.

Příkon záření, které dopadá na povrch atmosféry naší planety, byl stanoven na zhruba  $1360 \text{ W/m}^2$  a nazývá se solární konstanta [10]. Tato hodnota není v závislosti na čase plně konstantní, jelikož dráha, po které Země obíhá Slunce je eliptická. Hodnota se tedy o několik jednotek až desítek wattů liší na základě polohy Země vůči Slunci. Vycházíme tedy v tomto případě ze střední vzdálenosti Země od Slunce. Po průchodu atmosférou dopadne na samotný povrch planety v průměru zhruba  $1000 \text{ W/m}^2$  [11].

## 2 Fotovoltaické elektrárny



Obrázek 1: Blokové schéma zapojení FV elektrárny [1]

Nejčastější formou využití obnovitelných zdrojů, se kterou je možné se v běžném každodenním životě setkat, jsou fotovoltaické elektrárny. Jejich hlavním úkolem je převádět solární energii na energii elektrickou. K tomu je však zapotřebí celá řada prvků. Ty společně určitým způsobem komunikují, spolupracují a následně i mohou reagovat na nejrůznější změny nebo požadavky. Všechny jednotlivé nejdůležitější části celého systému budou ve výsledném laboratorním cvičení buďto přímo využity nebo simulovány.

### 2.1 FV články

Základním kamenem pro fungování kompletní FV elektrárny jsou fotovoltaické panely. Ty se skládají z jednotlivých článků. Samotné články slouží k přeměně slunečního záření na elektrickou energii. První zmínky a prototypy fotovoltaických článků pochází již z 19. století [3]. Do podoby, v jaké známe fotovoltaické články v dnešní době, se dostaly však až v polovině 20. století [3]. Tyto články dosahovaly účinnosti kolem 6 % [3]. Hlavní využití však našly FV články v kosmonautice, a to již v roce 1958. Pro družice je totiž solární energie v podstatě jediným možným zdrojem energie [12].



### 2.1.1 První generace FV článků

V současné době jsou technologicky dostupné tři různé generace FV článků [4]. Ta první je zdaleka ta nejrozšířenější. Tvoří totiž až 95 % celkové produkce solárních článků. Základním kamenem článků první generace jsou buďto monokrystalické nebo polykrystalické křemíkové destičky [14]. V nich se vytváří P–N přechod. Výroba článků první generace však vyžaduje velké množství čistého křemíku [14]. To má za důsledek vysokou výrobní, a tedy i pořizovací cenu. Účinnost těchto článků se pohybuje mezi 13–20 % [4].

### 2.1.2 Druhá generace FV článků

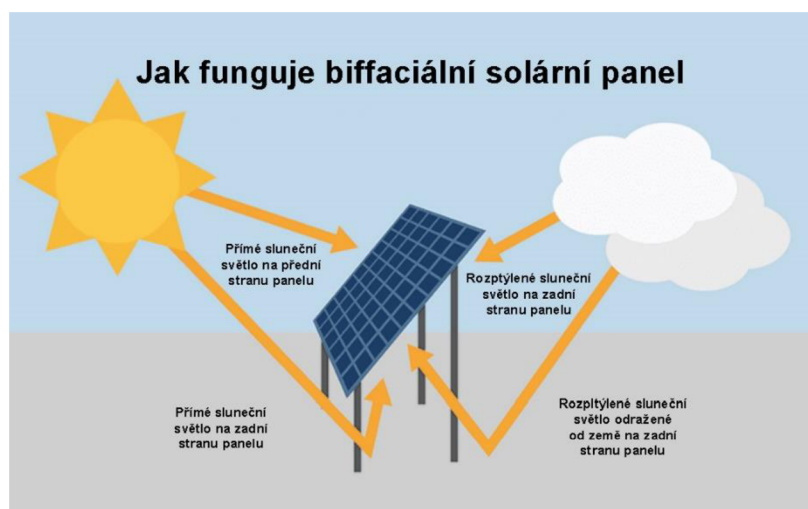
Koncepce druhé generace je tvořena tak, aby se co nejvíce ušetřilo na výrobních materiálech, a články díky tomu byly dostupnější. Tato koncepce se také nazývá tenkovrstvá. Jak již název napovídá, vrstvy materiálu jsou v tomto případě řádově 100 až 1000krát tenčí než u generace první [14]. Mezi hlavní výhody patří již zmiňovaná cena, která však i tak v současné době stoupá. V neposlední řadě lze za další výhodu považovat delší škálu možných konstrukčních provedení. Díky vlastnostem tenkovrstvých článků je totiž možné vytvořit například ohebné panely nebo panely pro různé speciální konstrukce, kde je zapotřebí složitější tvar solárního článku. Nevýhodou tenkovrstvých článků je však jejich relativně nízká účinnost, ta se pohybuje v rozmezí 6–10 % [4].

### 2.1.3 Třetí generace FV článků

Třetí generace fotovoltaického článku není tak úplně jednoznačná. Jedná se o totiž stále aktivně probíhající snahu a výzkumy o to, jak vyrobit panely s mnohem lepšími vlastnostmi [4]. Parametry, které jsou v tomto směru zásadní, a které se snaží třetí generace maximalizovat, je počet absorbovaného záření panelem a s tím související proudový zisk. Spousta komerčních verzí již existuje, nejedná se však vůbec o finální podobu toho, co by třetí generace měla představovat. Mezi dosavadní výsledky výzkumů patří různé technologie. Patří mezi ně například tzv. koncentrované články [14]. Tyto články jsou vícepřechodové a dopadající světlo je na ně koncentrováno pomocí kondenzátorů, jako jsou například zrcadla nebo čočky [14]. Další kategorií třetí generace jsou organické články [4]. V tomto případě se na rozdíl od prvních dvou generací nejedná o přeměnu pomocí klasického P–N přechodu, ale využívají se jako náhrada nejrůznější organické polymery nebo sloučeniny [4].

## 2.1.4 Bifaciální panely

Jedním ze speciálních provedení FV panelů jsou tzv. bifaciální. Jedná o panely, jejichž základem je monokrystalický křemík a účinnost těchto panelů je oproti klasickým panelům značně vyšší [13]. Takové účinnosti dosahují panely díky jejich oboustrannosti. Bifaciální panely jsou totiž schopné přijímat solární energii i ze spodní strany. To má za důsledek to, že panel využije i energii, která se například odrazí od střechy nebo jiných ploch a dopadá na stranu odvrácenou od přímého slunečního záření. Díky tomu se výrazně zvětší množství energie, kterou panel přijme a díky tomu i kolik elektrické energie ve výsledku vyrobí, to však při zachování stejných rozměrů. Pro maximální využití potenciálu bifaciálního panelu je důležité jeho umístění. Nejeftektivnější instalace takového panelu je totiž v určité výšce nad zemí. Tím má světlo větší možnost dopadnout na plochu pod panel a následně se odrazit k jeho povrchu. Jednou z možností instalace je i kolmé umístění panelu. Díky tomu panely při orientaci východ a západ vyrábí během jednoho dne dokonce i ve dvou výkonových špičkách. Zanikne díky tomu uspořádání i již zmiňovaná „odvrácená“ strana panelu a na obě dvě strany dopadne za celý den přibližně stejné množství záření, i to odražené od okolí.



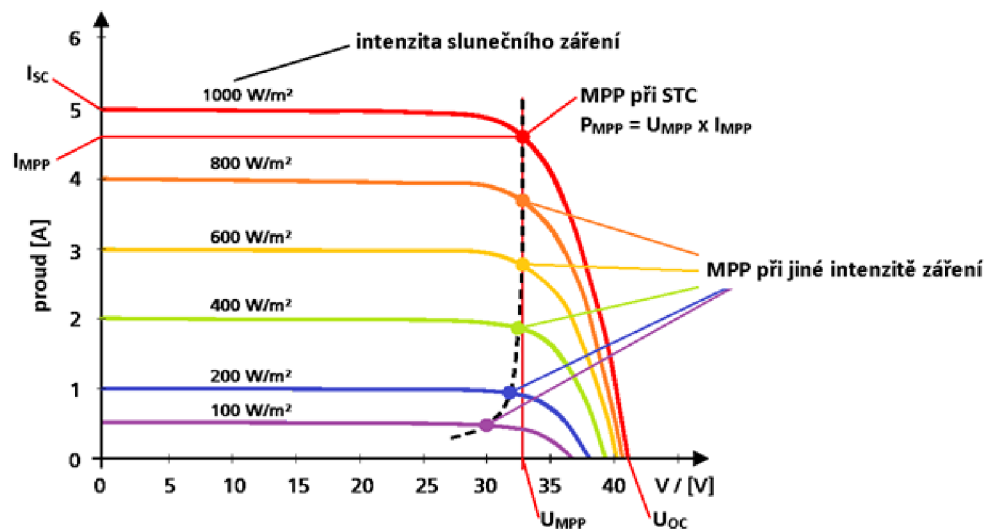
Obrázek 2: Bifaciální solární panel [5]

## 2.1.5 Různá konstrukční provedení FV panelů

V dnešní době lze na trhu najít řadu různých konstrukčních provedení fotovoltaických panelů. Jednotlivé druhy se od sebe liší v mnoha směrech. Prvním z nich je například velikost. Na trhu je nyní možné sehnat fotovoltaické panely, které disponují velikostí od řádově jednotek centimetrů až po jednotky až desítky metrů.

## 2.1.6 Parametry FV panelu

Při provozu FV panelu je zásadních několik parametrů. Prvním z nich je maximální hodnota proudu, tzv. zkratový proud  $I_{sc}$ . Ten udává maximální hodnotu proudu, který je panel schopný dodávat při určitém ozáření. Maximální napětí  $U_{oc}$  na panelu, ke kterému není připojena žádná zátěž, nazýváme napětí naprázdno. Vynásobením proudu a napětí vznikne výkon panelu. Každý FV panel má svou specifickou charakteristiku. V ní lze najít jeden bod, ve kterém je již zmiňovaný výkon daného článku maximální. Tento bod nazýváme MPP (Maximum Power Point neboli v překladu do češtiny bod maximálního výkonu). Tento jev nastává při určitých parametrech  $U_{mp}$  a  $I_{mp}$  viz. obrázek č. 3 (Obrázek 3) níže. Roli ve výsledné velikosti výkonu má však například i spektrum dopadajícího světla nebo teplota panelu.



Obrázek 3: VA charakteristika FV panelu při různých intenzitách [6]

Důležitými parametry může být i činitel plnění FF nebo účinnost panelu  $\eta$  udávaná vzorcem (1), kde  $U_{mp}$  a  $I_{mp}$  jsou hodnoty bodu maximálního výkonu panelu a  $P_{in}$  udává výkon dopadajícího záření na povrch FV panelu. [6]

$$\eta = (U_{mp} \cdot I_{mp}) / P_{in} \quad (1)$$

## 2.1.7 Možnosti simulace činnosti FV panelů

Pro laboratorní, a především výukové účely, by přímé využití FV panelu bylo značně neefektivní. Jedním z důvodů může být nutnost umístění mimo vnitřní prostory a kvůli tomu i nepřímý kontakt se samotným zařízením. Hlavním důvodem je však fakt, že během jednoho či více výukových bloků je pro lepší názornost a ukázkou vlastností jednotlivých prvků potřebné měnit vstupní parametry a na základě této změny pozorovat vliv na další chování systému. Z tohoto důvodu jsou FV články nahrazeny šesti stejnosměrnými zdroji IT-M3622 od firmy ITECH. Ty disponují maximálním výkonem 400 W, maximálním výstupním napětím 60 V proudem až 30 A. Hlavní výhodou těchto zdrojů je však i možnost kompaktního zapojení do jednoho celku, kdy jsou jednotlivé zdroje mezi sebou propojeny přes ethernet a celek jako takový lze připojit pomocí USB-B nebo ethernet k PC a následného ovládání. Možné je však využití komunikace i přes RS232. To uživateli otevírá další spoustu možností, jelikož zdroje je možné ovládat i pomocí softwaru v počítači.



Obrázek 4: DC zdroj řady IT-M3600 [16]

Tabulka 1: Parametry DC zdroje IT-M3622 [16]

|                         |               |
|-------------------------|---------------|
| <b>Maximální napětí</b> | 60 V          |
| <b>Maximální proud</b>  | 30 A          |
| <b>Maximální výkon</b>  | 400 W         |
| <b>Velikost</b>         | 1U Half-rack  |
| <b>Komunikace</b>       | USB, Ethernet |

## 2.2 Měníče pro fotovoltaiku

Na výstupu solárních článků bychom naměřili stejnosměrný proud. Většina spotřebičů v domácnosti, které chceme pomocí elektrárny napájet, však pro svůj provoz potřebují proud střídavý. Právě proto jsou důležitou součástí fotovoltaických elektráren střídače. Může však nastat i situace, kdy budeme při delší nepřízní počasí potřebovat nabíjet baterii z distribuční sítě. Z tohoto důvodu existují měniče obecně. Ty v sobě obsahují funkci jak střídače, tak usměrňovače nebo i stejnosměrné měniče pro nastavení parametrů nabíjecího proudu akumulátoru ze solárních článků. Tyto měniče se nazývají hybridní.

### 2.2.1 Mikroměníče

Jedním z efektivních řešení je zapojení FV článku za pomoci mikroměníčů. Jedná se o soustavu, kdy je každý z panelů, nebo menší string, připojený k samostatnému mikroměníči. Jeho výstup je však možné zapojit téměř kdekoli po budově přímo do sítě pouze za pomoci jisticích prvků. Není tedy vyžadováno žádné další zařízení pro připojení. Elektřina vyrobená články je rovnou převedena na 230 V a následně zužitkována ke spotřebě. To však pouze za předpokladu, že spotřebiče, které zužitkovávají energii z daného mikroměníče, mají větší spotřebu energie, než je maximální možný výkon dané větve fotovoltaické elektrárny. Díky tomu je tedy možné razantně snížit spotřebu elektrické energie odebírané ze sítě, ale bez nutnosti řešit přebytky energie. I to je však za určitých podmínek možné a schopnost připojení akumulátoru do systému se tedy nevylučuje.

Mikroměníč neustále měří napětí v síti a na základě jeho hodnoty upravuje svůj výstup. Díky tomu je schopný své výstupní napětí změnit na hodnotu vyšší, než je aktuálně v síti, zároveň však upravit frekvenci a fázový posun tak, aby spotřebič přednostně využíval energii vyrobenou solárními panely, a ne tu ze sítě. To z nich na druhou stranu dělá měniče vázané na distribuční síť a jejich využití je tedy možné pouze v on-grid zapojeních. On-grid systémy jsou ty, kdy je systém jako takový připojen k distribuční síti. V případě opačném se jedná o off-grid systémy, někdy také nazývány jako ostrovní. Mezi výhody připojení fotovoltaického systému však patří i fakt, že rozdělení soustavy solárních panelů na menší části a stringy napomáhá vyřešit problémy jako je například zastínění některých panelů a díky tomu zvýšení účinnosti celého systému. [7]

## 2.2.2 Měníče použité pro laboratorní úlohy

Aby bylo možné v laboratoři využívat veškerý potenciál všech zařízení a názorně předvést schopnosti různých zapojení systému, jsou využity jak hybridní měniče, tak mikroměníče.

Mikroměníče pro výukové potřeby byly zvoleny IQ 7+. Jedná se o jednofázové mikroměníče od společnosti Enphase. Ty disponují vysokou účinností a sdílí mezi sebou informace za pomoci powerline komunikace. [17]



Obrázek 5: Mikroměnič Enphase IQ 7+ [17]

Tabulka 2: Parametry mikroměníče IQ 7+ [17]

|  |                   |
|--|-------------------|
| <b>Rozměry</b>                           | 212 / 175 / 30 mm |
| <b>Hmotnost</b>                          | 1,08 kg           |
| <b>Špičkový výstupní výkon</b>           | 295 VA            |
| <b>Maximální ustálený výstupní výkon</b> | 290 VA            |
| <b>Pracovní napětí</b>                   | 16–60 V           |

Z řad hybridních měničů byl zvolen jednofázový model GW3648-EM od firmy GoodWe. Jde o hybridní měnič se dvěma MPPT a disponuje možností připojení akumulátoru. Tento měnič je zároveň vybaven dvěma výstupy. Na jeden z nich je připojena fáze rozvodu v budově, na druhém výstupu jsou připojeny zálohované spotřebiče. Při výpadku napájení ze sítě je tedy možné napájet takto připojené zařízení. Opět však nechybí možnost vzdáleného monitoringu jak výkonu FV elektrárny, tak i stavu baterie a možnost řídit aktuální strategii využití energie.



Obrázek 6: Hybridní měnič GW3648-EM [18]

Tabulka 3: Parametry měniče GW3648-EM [18]

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Výstupní AC výkon</b>                    | 3680 W    |
| <b>Výstupní back-up výkon na akumulátor</b> | 2300 VA   |
| <b>Výstupní AC napětí</b>                   | 230 V     |
| <b>Výstupní AC frekvence</b>                | 50 Hz     |
| <b>Přepnutí na back-up</b>                  | <10 ms    |
| <b>Maximální účinnost</b>                   | 97,6 %    |
| <b>Maximální napětí na MPPT vstupu</b>      | 550 V     |
| <b>Rozsah MPPT regulace</b>                 | 100–500 V |
| <b>Maximální výkon FV pole</b>              | 4600 W    |

Jako jednofázový měnič byl zvolen model SE3500H od společnosti SolarEdge. Tento měnič nedisponuje jakýmkoliv MPPT členem, jelikož je určen k provozu v kombinaci s optimizéry od stejné společnosti. Jeho maximální výstupní výkon je 3,5 kW. Výrobce se pyšní vysokou účinností, což bude záhy v praktické části ověřeno. Měnič je také schopen komunikovat s okolním světem za pomoci ethernet výstupu a jeho připojení do routeru. Díky tomu je možné vzdáleně sledovat aktuální stav výroby energie.



Obrázek 7: Měnič SolarEdge SE3500H [19]

Tabulka 4: Parametry měniče SE3500H [19]

|                                     |                        |
|-------------------------------------|------------------------|
| <b>Maximální AC výkon</b>           | 3,5 kW                 |
| <b>Výstupní AC napětí nominální</b> | 230 V                  |
| <b>Rozmezí AC napětí</b>            | 184–264,5 V            |
| <b>AC frekvence</b>                 | 50 Hz                  |
| <b>Maximální AC ustálený proud</b>  | 16 A                   |
| <b>Jmenovité DC napětí</b>          | 380 V                  |
| <b>Třída ochrany</b>                | IP65                   |
| <b>Rozměry</b>                      | 280 / 370 / 142 mm     |
| <b>Komunikace</b>                   | Ethernet, RS485, Wi-Fi |



## 2.3 Měřicí moduly

Měřicí moduly jsou důležitou součástí FV systému s bateriovým uložištěm. Často se lze také setkat s anglickým označením smart meter. Jedná se o prvek, který komunikuje se střídačem. Jeho úkolem je sledovat směr a velikost proudu v systému a odběr výkonu z elektrické sítě. Díky tomu je potom střídač schopný řídit, jak nakládat s elektrickou energií vyrobenou fotovoltaickou elektrárnou a případné uložení přebytků do akumulátoru.



Obrázek 8: Smart meter od společnosti GoodWe [20]

## 2.4 Výkonové optimizéry

Fotovoltaické panely instalované na budově nemusí mít v průběhu dne všechny přímý a stálý zdroj slunečního záření. Důvodem toho může být buď stín způsobený elektrickým vedením, stromy, komínem nebo jinou budovou, nebo i například znečištění panelů. Tím se v daný moment razantně snižuje výkon na výstupu zrovna zastíněného panelu. Střídač tedy funguje jako centrální jednotka, která se snaží optimalizovat výkon dodávaný celou soustavou panelů do sítě. Tím však vzniká stav, kdy stínem oslabené panely omezují ty, na které dopadá přímé světlo, v jejich maximálním možném výkonu, který mohou dodávat. Tento problém se dá vyřešit osazením buď všech nebo nejčastěji postižených panelů výkonovými optimizéry. Ty se umísťují na spodní část panelu. Mají na starosti sledovat výkon jednotlivých panelů zvlášť a tím neovlivňovat výsledný výkon celé soustavy fotovoltaických panelů. Střídač následně může pracovat za zidealizovaných podmínek a dodávat do soustavy značně vyšší výkon i během horších úrovní slunečního záření. Hlavním faktorem pro řešení tohoto problému je MPPT (Maximum Power Point Tracking), což znamená hledání bodu maximálního výkonu v zatěžovací charakteristice fotovoltaického panelu. Tento bod se snaží střídač hledat pro celou sérii panelů, zatímco optimizéry pouze pro jednotlivé panely. Díky tomu je i možné využívat vzdáleného sledování jednotlivých panelů a jejich současného stavu a průběhu výroby energie.

## 2.4.1 Optimizéry zvolené do laboratoře

Jak bylo již zmíněno, použitý jednofázový měnič SolarEdge potřebuje ke svému provozu výkonové optimizéry. Optimizéry se instalují každý přímo na jednotlivé panely. Proto bylo z důvodu použití šesti stejnosměrných zdrojů, které simulují šest FV panelů, zakoupeno šest výkonových optimizérů SolarEdge řady P485. Ty disponují funkcí MPPT a tvoří tak tedy efektivní řešení zvýšení výkonnosti elektrárny. To i díky tomu, že mezi sebou komunikují přímo po silovém vodiči.



Obrázek 9: Výkonový optimizér od společnosti SolarEdge [21]

## 2.5 Akumulátory pro fotovoltaické systémy

Mezi hlavní výhody fotovoltaické elektrárny patří i možnost energii uchovat a díky tomu si rozvrhnout její následné využití na základě naší spotřeby v určitém čase, počasí nebo například dočasného nedostatku energie z distribuční sítě. Abychom mohli energii uchovat a tím tento potenciál elektrárny plně využít, je zapotřebí akumulátor. Jedná se o zařízení, které je schopné buď jednorázově nebo opakovaně uchovávat energii.

Akumulátory elektrické energie lze rozdělit do několika kategorií na základě jejich principu. Patří mezi ně například chemická nebo tepelná. Elektřina vyráběná pomocí panelů nám může sloužit k výrobě tepla, díky kterému lze například ohřát vodu a tu následně akumulovat v bojleru nebo akumulacích kamnech. Pro naše výukové účely, a i pro většinu domácností, je však nejlepší bateriové uložení elektrické energie. Těch je na trhu v současnosti celá řada. Liší se hlavními parametry, kterými jsou například použité materiály, napětí, kapacita nebo i hloubka vybití.

Co se týče materiálů, v minulosti se obecně hojně využívali baterie olověné. Jejich hlavní výhodou byla nízká cena, ta je však v dnešní době již ve stínu nevýhod olověných baterií. Ty totiž po uživateli vyžadují pravidelný servis, jako je například dolévání destilované vody, a také nedisponují dlouhou životností. Proto se v dnešní době setkáváme téměř všude s bateriemi na bázi lithia. Tyto baterie se dále dělí na základě příměsí a sloučenin, která mají za důsledek zlepšení jejich vlastností. Lithiové baterie disponují v porovnání s olověnými výrazně vyšší efektivitou, menšími konstrukčními rozměry a delší životností.

Dalším důležitým parametrem bateriového uložení je jeho kapacita. Zjednodušeně lze říci, že čím větší kapacita, tím lépe. Je však potřeba kapacitu baterie zvolit úměrnou nejen naší spotřebě na základě velikosti domu a počtu osob, které v něm žijí, ale i parametrům fotovoltaické elektrárny. Kapacity baterií pro rodinné domy se pohybují v rozmezí od 6 do zhruba 15 kWh. Důležité je však zmínit i fakt, že čím menší procento kapacity obecně využíváme, tím méně se opotřebovává. I z toho důvodu je lepší při volbě vybrat baterii s o něco větší kapacitou. Pokud by však spotřeba energie dané budovy vzrostla, je možné uložení rozšířit o další články.

Parametrem, který je při výběru baterie potřeba zohlednit je hloubka vybití. Jedná se o parametr, který uživateli udává, do jaké hloubky je možné baterii maximálně vybit, aby nedocházelo k jejímu většímu opotřebení a následné degradaci. U lithiových baterií se tato hloubka udává v rozmezí od 85 % do 95 %. Při výběru je tedy důležité vzít v potaz, že baterii téměř nikdy využít ze 100 % a zároveň ji tím do určité míry nepoškodit. Lze z toho tedy odvodit, že v tomto případě je ideální, pokud se hloubka vybití použité baterie co nejvíce přibližuje 100 %. S tímto souvisí i počet nabíjecích cyklů baterie. Nabíjecím cyklem baterie se myslí jedno její plná nabití a následné plné vybití. Proto i z tohoto důvodu je nejvýhodnější využívat baterii v užším spektru její kapacity pro co nejmenší opotřebení.

Dalších parametrů baterií pro fotovoltaické elektrárny, která je potřeba brát v potaz, je další celá řada a je potřeba je zmínit. Patří mezi ně rozsah pracovních teplot, vnitřní odpor, napojení na Battery Management System (BMS) nebo maximální nabíjecí a vybíjecí proudy. [8]

## 2.5.1 Akumulátory použité v laboratoři

Pro účely třetí úlohy bylo zapotřebí vybrat vhodný akumulátor pro zapojení společně s jednofázovým hybridním měničem. Zvolen byl proto akumulátor US2000C od společnosti Pylontech. Tyto baterie fungují s měniči GoodWe výborně a jsou spoustou instalačních firem první volbou pro montáž společně právě s měniči GoodWe.

Zvolený model pracuje s napájením 48 V a jeho nominální kapacita je 2,4 kWh. Co se týče maximálního kontinuálního nabíjecího proudu, výrobce udává 25 A. Naproti tomu vybíjecí proud je udáván 50 A po dobu 60 vteřin nebo 90 A po dobu 15 vteřin [15].



Obrázek 10: Baterie Pylontech US2000C [22]

Tabulka 5: Parametry akumulátoru US2000C [22]

|   |  |
|---|--|
| <b>Technologie akumulátoru</b>              | LiFePO4                                  |
| <b>Nominální napětí</b>                     | 48 V                                     |
| <b>Nominální kapacita</b>                   | 50 Ah / 2,4 kWh                          |
| <b>Maximální hloubka vybití</b>             | 95 %                                     |
| <b>Maximální kontinuální nabíjecí proud</b> | 25 A                                     |
| <b>Maximální vybíjecí proud</b>             | 50 A po dobu 60 sec, 90 A po dobu 15 sec |

## 3 Software dostupný na trhu

### 3.1 SW pro návrh FV

Spousta domácností nebo firem může v aktuální situaci zvažovat investici do fotovoltaické elektrárny. I přes dotace, které jsou dnes na pořízení k dispozici, se může jednat o relativně vysokou částku. Aby však potenciální zákazník nemusel veškeré proporce individuální elektrárny manuálně počítat, je i v zájmu samotných poskytovatelů a výrobců nabízet a podporovat software, díky kterému si může zákazník vypočítat veškeré potřebné parametry individuální FV elektrárny a v závislosti na nich i předpokládanou návratnost.

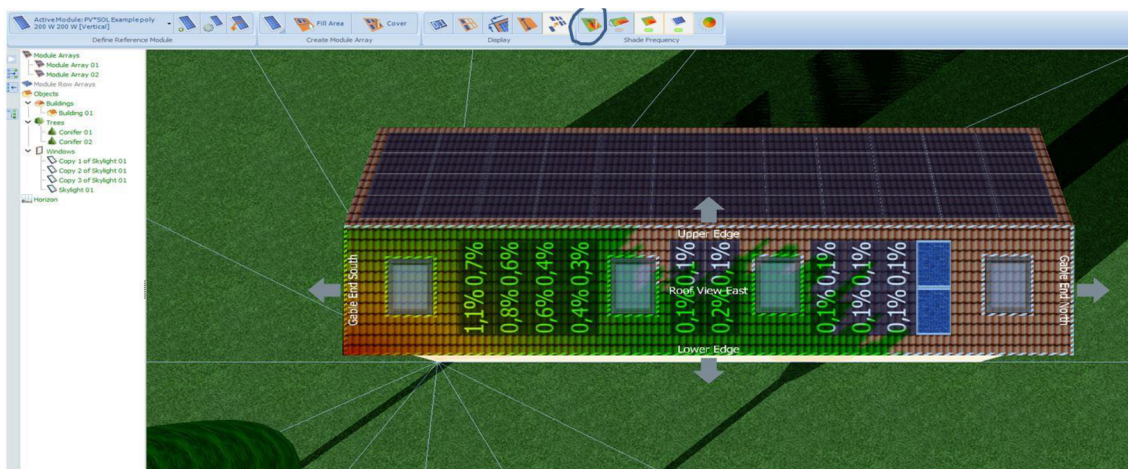
Jako jeden z těchto programů bych rád uvedl jako příklad PV\*sol. Jedná se o software, který hojně využívají jak už zmínění potenciální zákazníci, tak ale i celé realizační týmy, projektanti nebo architekti. PV\*sol funguje jako pomocník při návrhu a posouzení instalací FV elektráren. Díky němu je totiž i možné za pomoci energetických analytiků nebo dalšího softwaru optimalizovat již při návrhu strategii pro využití elektrické energie v dané budově.

PV\*sol však pro své co nejpřesnější fungování požaduje po uživateli i co nejpřesnější určení všech parametrů. Mezi ně patří primárně například lokalita, kde je možné vybírat z rozsáhlé databáze klimatických oblastí, sklon panelů, orientace vůči světovým stranám, typ střídače nebo přesný typ solárních panelů. Součástí programu je však rozsáhlý katalog modelů, které je možné na současném trhu sehnat.

Dalším důležitým parametrem pro analýzu FV elektrárny je okolí dané budovy. V něm se totiž můžou vyskytovat objekty, které mohou ve výsledku zásadně ovlivnit výkon a efektivitu elektrárny. Pro co nejpřesnější analýzu a vstupní data obsahuje PV\*sol implementovanou 3D vizualizaci. Díky ní je možné vymodelovat v měřítku danou budovu, kde a kolik se na ní bude nacházet FV panelů a všechny potenciálně rušivé elementy v okolí. Software je následně na základě zvolené klimatické oblasti schopný analyzovat, zda nebo v jaké míře dané objekty ovlivní funkčnost elektrárny.

Výsledkem po zadání všech těchto vstupních dat a vizualizací je podrobnější simulace. Ta uživateli nabídne několik optimálních řešení zapojení, výběru střídače nebo strategie využití energie. Pokud následně zúží uživatel výběr např. na konkrétnější značku střídače a zapojení, software je schopný přesněji vypočítat reálné předpokládané hodnoty vyrobené elektrické energie, účinnosti, vlivy změn počasí nebo i kompatibilitu celého systému. Díky tomu je možné dostat jako konečný výstup z programu ekonomickou analýzu celé investice.

Softwem, který rozhodně stojí za zmínku je SOLAR PRO, který se pyšní oproti konkurenci vysokou přesností díky algoritmu, který se schopný data propočítávat ve větší frekvenci, téměř až s přesností na minuty. Dalšími konkurenty jsou například Homer Pro, pvPlanner, PVsyst nebo program od společnosti Bosch. Hlavními rozdíly mezi jednotlivými softwary je jejich interface a uživatelské prostředí, obsahlost výstupu z programu, a i jeho cena. Některé programy jsou volně přístupné, avšak nenabízejí tolik funkcí. Proto se cena licence programu, který nabídne uživateli širší škálu možností a informací, jako je například již zmiňovaný PV\*sol, pohybuje v řádu tisíc euro. Částka však může dosahovat až násobně vyšších hodnot. Z tohoto důvodu může být pro daného zákazníka jednodušší kontaktovat přímo společnost, která se instalací a návrhem FV elektráren zabývá a má veškeré profesionální softwary k dispozici. [9]



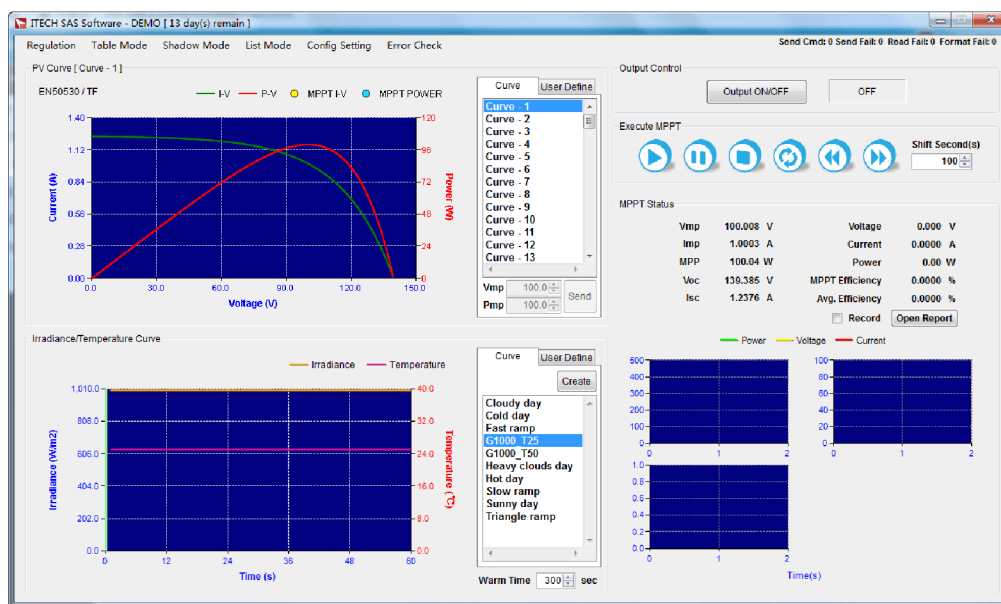
Obrázek 11: Simulace objektu pomocí SW PV\*Sol [23]



## 3.2 SW pro simulaci FV

Softwarem, který bude využívám pro simulaci FV panelů a řízení zdrojů IT-M3622, je ITECH SAS1000 od stejné firmy jako samotné zdroje. SAS1000 je program pro simulaci fotovoltaických elektráren, který umožňuje inženýrům a odborníkům z oblasti obnovitelných zdrojů energie vypočítat výkon fotovoltaického systému a predikovat jeho výkonnost v závislosti na různých vstupních podmínkách, jako jsou sluneční záření, teplota a orientace panelů.

SAS1000 umožňuje uživatelům simulovat různé scénáře a optimalizovat parametry systému. Program tedy nabízí řadu možností, jak testovat FV systémy a ověřovat jejich vlastnosti. První z nich je pouze základní chování FV panelu. Uživatel si tedy nastaví parametry FV panelu, upraví tím tedy jeho charakteristiky. Následně jen stačí spustit zapnout výstup zdroje a ten se již následně chová jako FV panel za ideálních podmínek. Díky tomu je následně možné například nerušeně sledovat chování MPPT.



Obrázek 12: Simulace FV panelu v programu SAS1000M [24]

Další z nich je možnost měření efektivity MPPT měniče podle normy ČSN EN 50530. Software má již v sobě přednastavené hodnoty a stupně testování. Uživatelé tedy jen stačí podle normy korektně zapojit všechny prvky, měřicí přístroje a uzpůsobit pracoviště svému měření. Následně stačí jen spustit jeden z normovaných testů. Program SAS1000M navíc umožňuje zaznamenávat průběh měření a následně naměřené hodnoty vyexportovat do souboru CSV. Měřené hodnoty se zapisují zhruba každou vteřinu.



Třetím způsobem, jak využívat SW od společnosti ITECH, je simulace zastínění FV panelů. Díky implementovanému katalogu výrobců a jednotlivých modelů FV panelů si může uživatel jednoduše vybrat přímo ten, který ho zajímá, nebo který je svými charakteristikami nejpodobnější tomu, jehož chování chce simulovat viz. Následně již stačí díky grafickému zobrazení nasimulovat tvar a rozmístění jednotlivých článků a stringů. Dalším krokem je vyznačení potenciálního zastínění, a to i v několika možných intenzitách pro co nejpřesnější simulaci. Posléze je důležité nastavit světovou orientaci simulovaných panelů. To lze pouze nepřímou, a to díky možnosti simulace pohybu Slunce po obloze, i včetně jeho rychlosti, a tím modelovat pohyb stínu po soustavě FV panelů. Po nastavení všech vstupních parametrů jen stačí spustit test a uživatel již může sledovat vliv zastínění na výkon celého stringu.

Celkově lze tedy říci, že program SAS1000 je cenným nástrojem pro odborníky z oblasti obnovitelných zdrojů energie, kteří chtějí navrhovat, optimalizovat a provádět analýzy fotovoltaických elektráren s cílem maximalizovat jejich výkon a ziskovost.

## 4 Možnosti řízení a nakládání s energií

Fotovoltaická elektrárna v rodinném domě je v dnešní době velmi populární volbou pro mnoho majitelů domů, kteří chtějí snížit své náklady na elektřinu a současně přispět k ochraně životního prostředí. Existuje několik strategií nakládání s elektrickou energií, které majitelé rodinných domů mohou použít, aby co nejvíce využili výkon svých fotovoltaických panelů.

První možností je přímé použití elektřiny vyrobené z fotovoltaických panelů pro vlastní potřebu v domácnosti. Jako jedna z možností může být například již zmiňovaná FV elektrárna za pomoci mikroměničů. Tato strategie umožňuje majitelům domů snížit své náklady na elektřinu tím, že využívají elektřinu získanou z vlastního zdroje namísto nákupu elektřiny od dodavatele. Pokud je objekt v provozu během dne, kdy se vyrábí nejvíce energie z fotovoltaických panelů, může tato strategie výrazně snížit náklady na elektřinu.

Druhou možností je uložení elektřiny do baterií a její použití později. Tato strategie je užitečná v situacích, kdy majitelé nemohou využít energii z fotovoltaických panelů okamžitě, například pokud jsou pryč z domu během dne. Ukládání elektřiny do baterií umožňuje majitelům využívat získanou energii kdykoliv a opět tak minimalizovat náklady na provoz domu.

Třetí možností je prodej elektřiny zpět do sítě. Pokud majitelé domů nevyužívají veškerou energii vyrobenou z fotovoltaických panelů, mohou ji prodat zpět do sítě a získat finanční odměnu od dodavatele. Tato strategie umožňuje majitelům domů maximalizovat svůj zisk a přispět k většímu množství obnovitelné energie v síti.

Logicky se však nabízí i možnost kombinace těchto strategií. Je však na uvážení každého, kdo fotovoltaický systém navrhuje pro danou problematiku. Každá instalace, a i její uživatel, jsou svým způsobem unikátní. Důležitým parametrem může být celková spotřeba energie nebo jak se spotřeba mění v průběhu dne. Na základě těchto vstupních dat je následně důležité si veškeré možnosti propočítat a dojít k závěru, které ze strategií naložení s energií je pro danou situaci nejvýhodnější.

## 5 Měřidla

Pro první měření byly použity multimetry a proudové kleště. To z důvodu malých prostor na pracovišti. Zároveň však bylo zapotřebí pouhé porovnání vstupního a výstupního výkonu nebo napětí v síti. Tím pádem byl větší počet měřidel zároveň i přehlednější. Pro výukové potřeby bude však laboratoř vybavena výkonovým analyzátozem Fluke Norma. Ten nabízí sledování několika různých signálů a jejich vlastností. Zároveň však uživateli umožňuje naměřená ukládat pro následné zpracování.

## 6 Praktická část

Hlavním cílem celé práce je vytvoření laboratoře, která bude obsahovat jednotlivá stanoviště s různými úlohami, kde si studenti budou moci ověřit vlastnosti a zapojení FV elektráren v rámci výuky. Proto bylo zapotřebí zvolit odpovídající prvky, které by pokryly co nejširší spektrum možných zapojení a konfigurací elektrárny. Následovalo prvotní zapojení, proměření prvků pro ověření funkčnosti a v neposlední řadě vytvoření postupu a návodu pro jednotlivé úlohy.

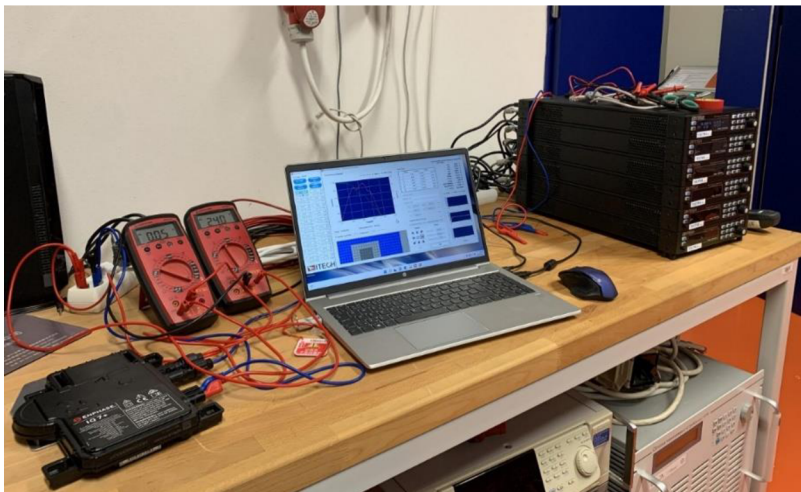
### 6.1 První úloha

Jako první úloha bylo zvoleno zapojení s mikroměničem. Jedná se o dle mého nejjednodušší zapojení a jakýsi vstupní krok do světa fotovoltaiky. Prvním krokem tedy bylo již zmiňované prvotní zapojení a následné měření.

Samotná úloha se skládá z několika hlavních částí. Samozřejmostí je samotný mikroměnič, a DC zdroj IT-M3622, který je řízený pomocí softwaru SAS1000M. Prvotní měření a zapojení proběhla ještě bez použití MPB. Mikroměnič se tedy ke zdroji připojil za pomoci laboratorních a výukových vodičů s banánky. Zprvu se jiná možnost ani nenabízela, a to z důvodu nedostatku konektorů MC4 a konektorů pro připojení AC strany. Pro měření byly prozatím použity dva multimetry. První byl zapojen sériově jako ampérmetr, druhý paralelně jako voltmetr. Pomocí těchto měřidel bylo kontrolováno napětí v síti a proud tekoucí z mikroměniče do sítě. Následně tedy bylo možné porovnávat vstupní výkon ze zdroje, výstupní výkon do sítě, a tedy i účinnost. Po kompletním zapojení úlohy se připojil k počítači jeden ze zdrojů. Komunikace s PC probíhala v pořádku a zdroj reagoval na nastavené hodnoty. Pro prvotní ověření vlastností jsem si pomocí softwaru nastavil vymyšlené zaokrouhlené hodnoty panelu pro jednodušší výpočty. Hodnoty MPP byly nastaveny manuálně na 35 V a zhruba 3 A. Jednalo se tedy o hodnoty, na kterých by se měl mikroměnič díky funkci MPPT ustálit.

Následně byl zapnut výstup zdroje a kontrolováno chování mikroměniče. Na výstupu zdroje se objevilo maximální napětí  $U_{oc}$ , proud nulový. Mikroměnič si začal ze zdroje odebírat čím dál tím větší proud, aby se zvyšoval výkon na DC vstupu mikroměniče, hodnota napětí se však lehce snižovala. Měnič tedy vykazoval korektní chování a MPPT se tedy nejspíš správně snažil najít bod maximálního výkonu. Po chvíli se začaly hodnoty na výstupu zdroje blížit k hodnotám MPP. V ten moment však nastal nečekaný problém. Po překročení MPP si mikroměnič snížil DC napětí ze zdroje na 16 V a polovinu MPP výkonu. Na těchto hodnotách se ustálil a nevykazoval jakékoliv známky snahy dostat se opět do bodu maximálního výkonu. Jeho chování se zdálo poněkud

zvláštní a měření tedy proběhlo stejným způsobem znovu. Výsledek byl však stejný. Následně jsem tedy provedl ještě několik dalších testů, tentokrát však pokaždé s jinými parametry výstupního napětí zdroje. Výsledek měření byl ale pokaždé opět stejný. Nehledě na vstupní hodnoty si vždy mikroměnič stáhl napětí na zásadně 16 V a na polovinu výkonu MPP. Na obrázku č.13 (Obrázek 13) níže lze vidět pracoviště během zmiňovaných prvních testů.



Obrázek 13: Prvotní zapojení první úlohy

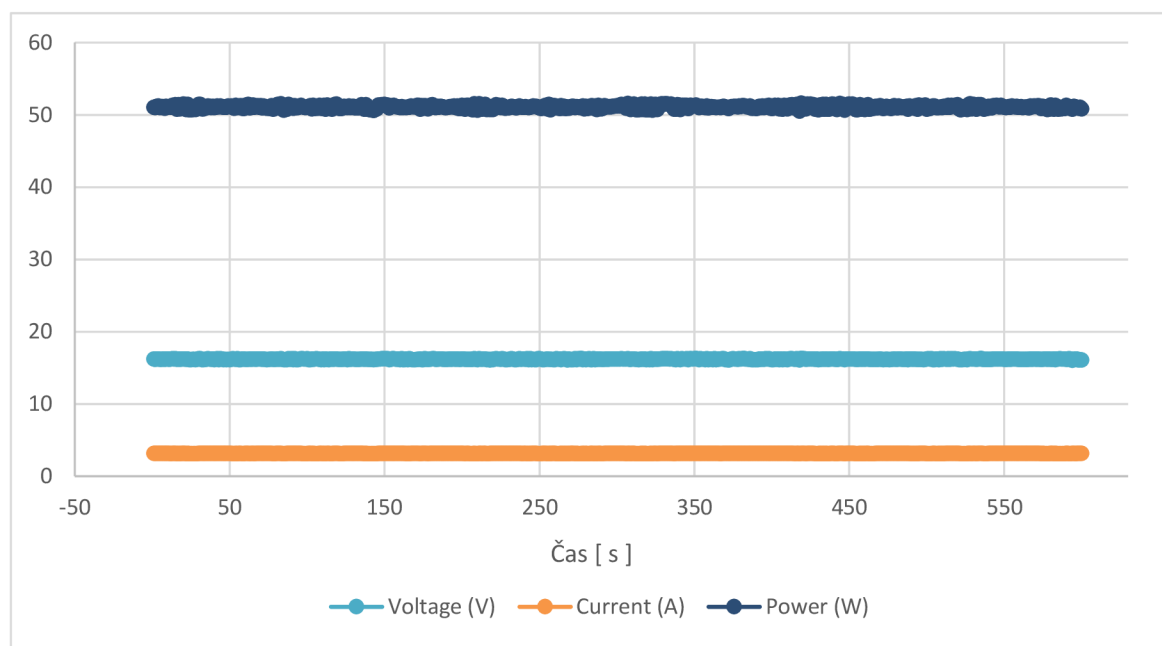
Přestoupil jsem tedy prozatím k dalšímu kroku. Tím je test pro ověření účinnosti, a to podle normy ČSN EN50530. Ta udává, jakým způsobem má být připraveno pracoviště k testu a schéma pro správné zapojení měřidel. V této specifikaci je i uvedena tabulka pro zápis relevantních hodnot a vzorce pro následné výpočty samotných účinností. Normovaný test probíhá v celkem osmi různých výkonostních úrovních. Zároveň se však mění parametry simulovaného fotovoltaického pole. Těmito parametry jsou materiál simulovaného panelu, jeho maximální hodnoty napětí a výkonu nebo i intenzita osvětlení nebo teplota panelu.

Software SAS1000M nabízí jako jednu ze svých funkcionalit normované testy. Jedna z předinstalovaných norem je právě požadovaná norma ČSN EN50530. Program tedy uživateli nabízí rovnou měnit parametry přesně tak, jak je potřebné pro správné provedení testu. Přestoupil jsem tedy k samotnému testování. Trvání samotné zkoušky je také uvedeno v normě, je však zapotřebí mikroměnič věnovat nejdříve tzv. warm time. Jedná se o zhruba 5 minut, které má měnič na přifázování k síti a nalezení bodu MPP. Na začátku testu, kdy začínáme odečítat naměřená data, by tedy měl být měnič ve fázi ustáleného provozu. V tomto případě však během tohoto času, kdy se mikroměnič měl ustálit na bodu MPP, nastala stejná chyba jako při prvotním měření a výkon měniče upadl na polovinu. Po uběhnutí pěti minut začíná odpočet nastaveného času pro samotný test a v ten moment se začínají i nahrávat data do souboru pro následný export.

Tabulka 6: Normovaný test účinnosti měniče

| Time         | Vmp (V) | Imp (A) | Pmp (W) | MPP Energy (Wh) | Voltage (V) | Current (A) | Power (W) | Meas Energy (Wh) | MPPT Eff(%) | Irradiance (W/m2) | Temp. (C) |
|--------------|---------|---------|---------|-----------------|-------------|-------------|-----------|------------------|-------------|-------------------|-----------|
| 13:18:12.812 | 35      | 2,85    | 99,9    | 0               | 16,2        | 3,15        | 51,1      | 0                | 51,1        | 1000              | 25        |
| 13:18:13.825 | 35      | 2,85    | 99,9    | 0,03            | 16,2        | 3,15        | 51        | 0,01             | 51          | 1000              | 25        |
| 13:18:14.846 | 35      | 2,85    | 99,9    | 0,06            | 16,2        | 3,16        | 51,2      | 0,03             | 51,2        | 1000              | 25        |
| 13:18:15.861 | 35      | 2,85    | 99,9    | 0,08            | 16,2        | 3,16        | 51,2      | 0,04             | 51,3        | 1000              | 25        |
| 13:18:16.878 | 35      | 2,85    | 99,9    | 0,11            | 16,2        | 3,16        | 51        | 0,06             | 51,1        | 1000              | 25        |
| 13:18:17.912 | 35      | 2,85    | 99,9    | 0,14            | 16,2        | 3,16        | 51,2      | 0,07             | 51,2        | 1000              | 25        |
| 13:18:18.925 | 35      | 2,85    | 99,9    | 0,17            | 16,2        | 3,15        | 51,1      | 0,09             | 51,2        | 1000              | 25        |
| 13:18:19.939 | 35      | 2,85    | 99,9    | 0,2             | 16,2        | 3,15        | 50,9      | 0,1              | 51          | 1000              | 25        |
| 13:18:20.988 | 35      | 2,85    | 99,9    | 0,23            | 16,2        | 3,15        | 51,2      | 0,12             | 51,2        | 1000              | 25        |
| 13:18:22.035 | 35      | 2,85    | 99,9    | 0,26            | 16,2        | 3,15        | 51        | 0,13             | 51,1        | 1000              | 25        |

V tabulce č.6 (Tabulka 6) lze vidět výběr dat ze souboru, který vygeneroval program SAS1000M po ukončení měření. Záznam obsahuje jak nastavené hodnoty uživatelem, tak i reálné hodnoty z výstupu zdroje. Zároveň lze vyzorovat, že software zaznamenává hodnoty přibližně každou vteřinu. Je z dat i zřejmé chování měniče. Konstantně udržoval zhruba polovinu maximálního výkonu, a to v průběhu celého testu. Na grafu č. 1 (Graf 1) níže lze průběh výstupních hodnot zdroje za celou dobu měření.



Graf 1: Normovaný test účinnosti měniče

## 6.2 Druhá úloha

Jako druhá úloha bylo zvoleno zapojení 1f měniče od firmy SolarEdge. Oproti první úloze se jedná o něco složitější systém z důvodu použití samostatných jednotlivých optimizérů a všech šesti DC zdrojů. Avšak obecně je tato úloha svým principem velice podobná té první.

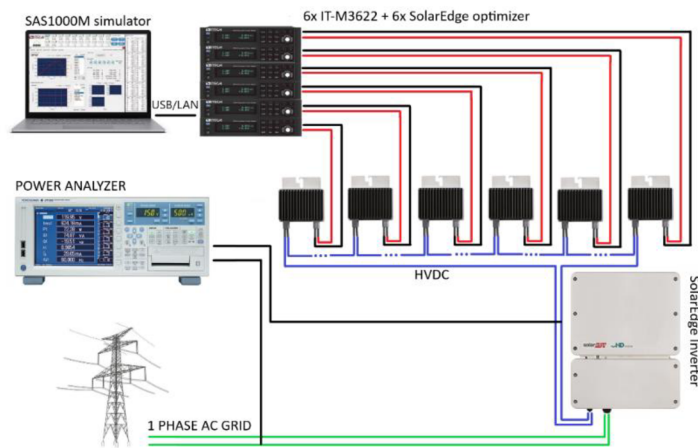
Jako jeden z prvních kroků bylo zapotřebí vytvořit potřebné vodiče na propojení zdrojů a optimizérů. To znamenalo na jednu stranu vodiče nakrimpovat solární konektor MC4 a na druhou stranu vodiče dutinku pro připojení ke zdroji. Průměr vodiče byl zvolen 1,5 mm<sup>2</sup>. I přes to, že zdroj je schopný dodávat do obvodu až 30 A, v úlohách a měřeních není v plánu pracovat s proudem větším než 15 A i z důvodu zvolené ochrany, průřez vodiče bude tedy dostatečný. Proces samotného krimpování konektorů MC4 je překvapivě jednoduchý a rychlý. Konektor je pouze potřeba rozšroubovat, odholený vodič zasunout do kovového kontaktu, následně pomocí speciálních kleští vodič do konektoru zalisovat a následně konektor s vodičem zasunout do plastového těla konektoru, dokud není slyšet zřetelné cvaknutí.

Dalším krokem bylo zprovoznění všech šesti zdrojů a opět jejich ovládání pomocí softwaru SAS1000M. Zdroje jsem tedy propojil mezi sebou přiloženými ethernetovými kabely. Pomyslný hlavní zdroj, který je osazen komunikační kartou s USB a ethernet portem jsem propojil opět za pomoci USB-B kabelu. SW totiž při inicializaci USB rozraní rozezná, ethernet port však nekomunikoval se zdrojem korektně. Nicméně i přes funkční komunikaci přes USB jsem narazil na zásadní problém. Po spuštění programu se na všech zdrojích zobrazí ikona úspěšné komunikace. Avšak na nastavení pomocí softwaru reaguje pouze zdroj s komunikační kartou a výstupy ostatních zdrojů zůstávají na nule. I přes veškerá různá nastavení a konfigurace se mi nepodařilo ovládání několika zdrojů vzdáleně nepodařilo. Výstupní hodnoty zdrojů tedy bylo zapotřebí nastavit manuálně. V praxi to nemá na výsledek měření téměř žádný vliv, jediným problémem je delší trvání nastavení.

Na obrázku č. 14 (*Obrázek 14*) je blokové schéma úlohy. Jednotlivé optimizéry se připojí ke zdroji napětí. DC výstupy z optimizérů se sériově propojí. Na DC vstup měniče se tedy připojí kladný pól prvního z optimizérů a záporný pól posledního. Díky konektorům MC4 je propojení DC strany rychlé a jednoduché. Zároveň je díky rozlišnosti kladného a záporného MC4 konektoru složitější udělat během propojování chybu.



## 2. Měření na 1f měnící s optimitéry



Obrázek 14: Blokové schéma druhé úlohy

Následujícím krokem bylo připojit AC výstup měniče do sítě. K tomu byl použit jednofázový kabel se zásuvkovou vidlicí. Na druhém konci bylo zapotřebí odholit jednotlivé vodiče. Jednotlivé délky odhalení vodičů byly uvedeny přímo ve specifikaci a návodu k měniči. Pro instalaci k samotnému měniči je však tentokrát zapotřebí demontovat víko měniče. Pod ním se nachází označená svorkovnice pro připojení. Dále lze pod krytem najít port pro připojení ethernetové kabelu pro komunikaci a monitoring měniče. Je však z důvodu malého průměru průchodky protáhnout skrz pouze samotný kabel a konektory až následně nakrimpovat. I z tohoto důvodu byly jedny z prvotních testů prováděny s odmontovaným krytem měniče, aby bylo možné zkontrolovat právě funkčnost komunikace. Tímto byla fyzická část zapojení měniče kompletní.

SolarEdge nabízí několik mobilních aplikací, které mají různá využití. Jednou z nich je SolarEdge SetApp. Jedná se o aplikaci pro instalátory a montéry FV systému, která umožní jednodušeji jednotlivé prvky elektrárny propojit a zprovoznit. Nejdříve je zapotřebí založit si účet instalátora FV systému SolarEdge. Následná instalace a uvedení elektrárny do provozu se provádí právě již za použití této mobilní aplikace. Instalátor postupně naskenuje QR kódy na instalovaných zařízeních v takovém pořadí, jak je mu určováno v aplikaci. Dalším krokem je připojení se k samotnému střídači pomocí Wi-Fi. Díky tomu je možné stáhnout a nainstalovat jak do střídače, tak do optimizérů, nejnovější firmware. Tím pádem je zajištěn co nejlepší chod elektrárny. Následuje už jen párování jednotlivých optimizérů s měničem. Komunikaci jednotlivých prvků si lze také ověřit v aplikaci. Hned při první instalaci se však právě toto párování nepodařilo. Aplikace hlásila pouze 5 komunikujících optimizérů i přes to, že fyzicky jich bylo zapojeno 6 a ani jeden z konektorů nebyl na pohled zničený nebo špatně zapojený.



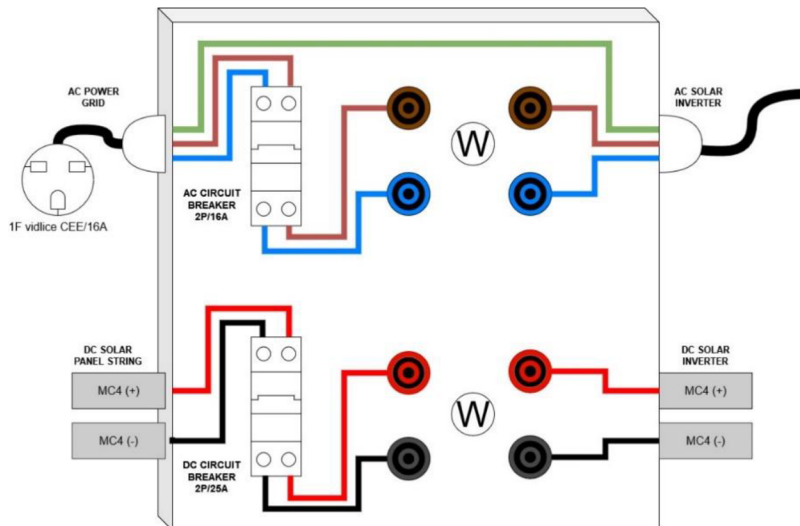
Párování tedy proběhlo ještě jednou a tentokrát komunikovaly již pouze 4. Pokus o nápravu se tedy opakoval, nyní už kontakt navázaly pouze 3 optimizéry. V pokusu o úspěšné párování jsem tedy již nepokračoval. Samotná instalace a zprovoznění tedy netrvá dlouho a díky detailnímu návodu v aplikaci je i velice jednoduchá. Nyní jen stačilo zapnout výstupy jednotlivých zdrojů. Díky aplikaci SetApp je možné při nepřerušeném připojení k měniči sledovat stav a hodnoty měniče. Ten vykazoval známky o vytváření výkonu na výstupu, avšak velice nestabilně a kolísavě. Podobné chování bylo možné pozorovat i na výstupech jednotlivých DC zdrojů. Všech šest zdrojů mělo nulový výkon na výstupech, v náhodných intervalech a na maximálně několik vteřin však vzrostl jejich výstupní výkon na pouhých pár procent maximálního nastaveného výkonu. Odhadovanou příčinou byly nekomunikující optimizéry a tím pádem snaha měniče optimalizovat takto handicapovaný string. Při dalším testování tedy proběhl opětovný pokus o párování. Tentokrát úspěšně a aplikace hlásila úspěšnou komunikaci se všemi šesti optimizéry. Proběhlo tedy opětovné zapojení zdrojů a monitoring pomocí mobilní aplikace. Měnič však vykazoval stále ty stejné snahy o konstantní výstupní výkon, ovšem hodnoty na výstupu zdrojů se stále pohybovaly okolo nuly. Testování bylo tedy pro tento moment prozatím ukončeno.

SolarEdge nabízí i možnost monitorování měniče a připojeného systému vzdáleně pomocí webového prostředí SE Monitoring. K tomu je zapotřebí připojit měnič k síti, aby mohl data předávat dál. Je tedy nutné použít router. Ten se ethernetovým kabelem připojí například k domovní síti, a zároveň se do routeru připojí ethernetový kabel z měniče. Tím je zajištěna komunikace měniče se serverem.

Dalším krokem bylo nastavení koncových uživatelů pro monitoring. To může provádět opět pouze instalatér přes svůj SolarEdge účet, kde má rozšířená oprávnění a možnosti. Na webu je po přihlášení tedy možné následně přidat uživatele k jednotlivým systémům, která instalatér zprovoznil. Dále už jen stačí nastavit těmto uživatelům oprávnění v dané instalaci a nasdílet jim jejich přihlašovací údaje do monitorovacího rozhraní. Toto prostředí nabízí statistiku vyrobené energie elektrárnou a přibližný aktuální výkon. Z důvodu, že měnič komunikuje přes server, tedy nepřímou, je odezva dat relativně velká. Pro běžný vzdálený monitoring uživatelem je však prostředí a reakce rozhraní naprosto dostačující.

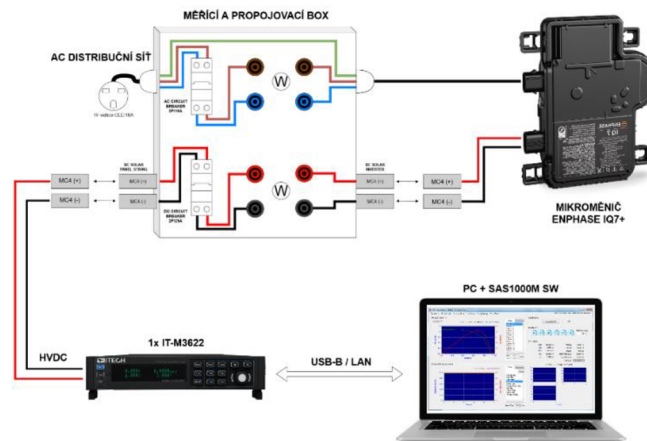
## 6.3 Měřicí box

Původní myšlenkou bylo nechat studenta zapojovat samotné prvky mezi sebou, konektory přímo na samotných zařízeních, tak jak by se s tím setkali v reálném zapojení. Z důvodu bezpečnosti byl však navrhnout tzv. měřicí a propojovací box (MPB). Ten obsahuje svorky pro připojení výkonového analyzátoru pomocí izolovaných banánek a výstup pro připojení boxu do distribuční sítě. Zároveň box disponuje konektory MC4 pro připojení stejnosměrných zdrojů a měniče, kde se zároveň však zachová prvek reálného zapojení a student se tak setká i s technikou, která se v praxi běžně využívá. Měřicí box tedy neubírá samotné úloze nebo cvičení na praktičnosti. Bezpečnost studentů se zároveň zvyšuje i díky použití ochranných prvků, v tomto případě za pomoci jističů na obou připojovaných obvodech. Na straně stejnosměrného napětí byl zvolen dvou pólový jistič s jmenovitým proudem 25 A. DC zdroje mají maximální možný proud na výstupu až 30 A, pro větší úroveň bezpečnosti je však lepší, aby byl jmenovitý proud jističe o něco menší. V úlohách bude navíc pro jistotu výstupní výkon zdrojů určen tak, aby nedocházelo k nadměrnému a častému přetěžování ochrany. Co se týče ochrany pro AC část obvodu, zde byl opět zvolen dvou pólový jistič, tentokrát však s jmenovitým proudem 16 A. Pokud bychom využívali každý ze šesti zdrojů na jeho maximální výkon, tedy 400 W, i tak bychom měli na vstupu do měniče výkon maximálně 2400 W. To by tedy znamenalo, že i při zanedbání ztrát v měniči bude proud na AC výstupu měniče maximálně zhruba 10 A. Přibližné schéma měřicího boxu je na obrázku č. 15 (Obrázek 15).

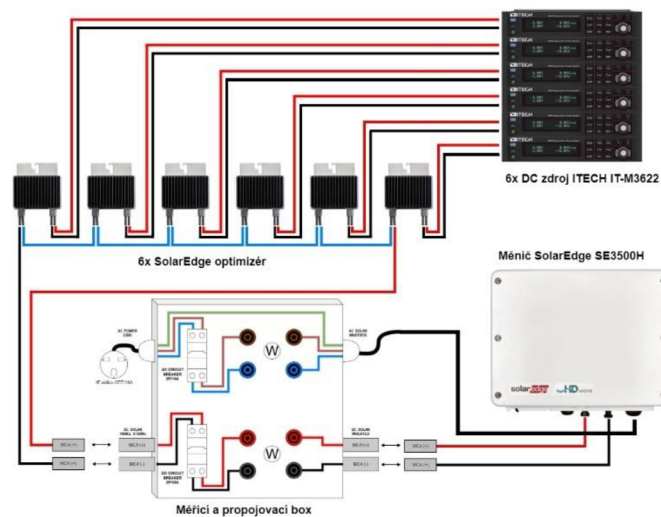


Obrázek 15: Měřicí a propojovací box

Zároveň byl tento box navrhnut tak, aby byl co nejuniverzálnější. Je tedy možné ho využít jak v první, tak i ve druhé úloze. Je dostatečně dimenzován pro obě využití, a i z důvodu stejného počtu potřebných konektorů pro připojení všech prvků se jedná o ideální řešení. Na obrázku č. 16 (Obrázek 16) níže lze vidět blokové schéma zapojení první úlohy za pomoci měřicího a propojovacího boxu a na obrázku č. 17 (Obrázek 17) upravené blokové schéma druhé úlohy.



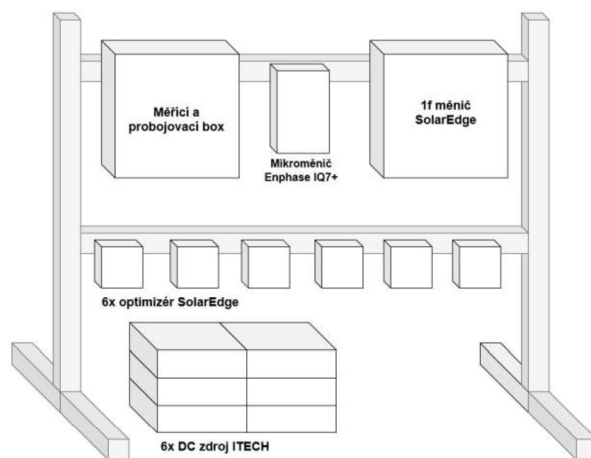
Obrázek 16: Zapojení první úlohy za pomoci MPB



Obrázek 17: Zapojení druhé úlohy za pomoci MPB

## 6.4 Stojan pro první úlohy

Doposud probíhala všechna měření a testování v neupravené formě, kdy jednotlivé prvky a zařízení nebyly fixně ukotveny nebo umístěny. Pro výukové potřeby je však nutné vytvořit stanoviště, kde bude stojany s pevně usazenými prvky tak, aby nebyla narušena bezpečnost studentů a vyučujících. Z tohoto důvodu byl navržen a sestaven stojan. Díky MPB bylo možné integrovat obě dvě první úlohy do jednoho stojanu. Jedná se o konstrukci z hliníkových profilů. K nim jsou namontovaná jednotlivá zařízení. Stojan je díky použité konstrukci a materiálu lehký a stabilní. Studenti tak tedy přistoupí k připravenému stojanu se všemi potřebnými prvky a následně jen propojí vše potřebné.



Obrázek 18: Stojan pro první dvě úlohy



Obrázek 19: Prvotní měření na vytvořeném stojanu

## 6.5 Třetí úloha

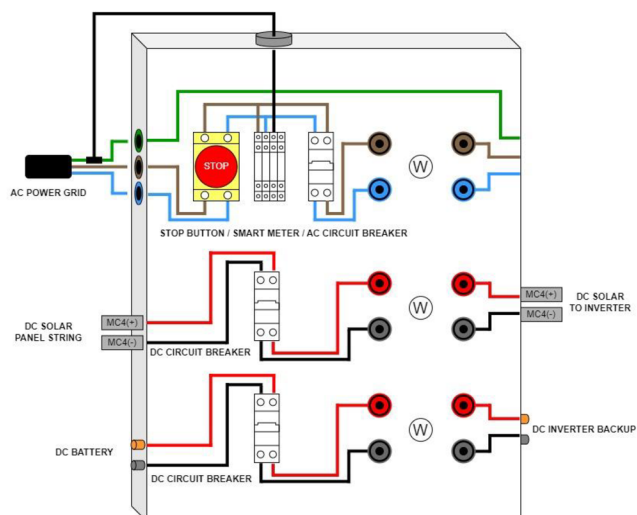
Jako třetí úloha bylo navrženo již komplexnější řešení a zapojení. Tento systém totiž disponuje 1f hybridním měničem GoodWe GW3648-EM. K němu je připojena baterie Pylontech US2000C. Ty mezi sebou komunikují pomocí CAN sběrnice. Celý systém je samozřejmě jistěn pomocí několika proudových ochran. Zároveň se přidává oproti prvním úlohám další prvek. Tím je smart meter. Ten je v praktickém zapojení umístěn společně s ochranou v rozvaděči. Zároveň je zapotřebí použít i jiný DC zdroj. Jedná se opět o zdroj od společnosti ITECH, tentokrát však o model IT6006C-500-40.

Přímo pro tuto úlohu byla navržena další verze MPB. V základu je měřicí box pro tuto úlohu velice podobný tomu prvnímu, nicméně je však rozšířený o třetí sadu ochrany a svorek, pro připojení výkonového analyzátoru. Tato část MPB slouží k připojení bateriového systému do měniče. Dále bylo zapotřebí do druhé verze boxu zakomponovat již zmiňovaný smart meter. Ten je umístěn hned u proudové ochrany pro připojení do distribuční sítě. Proudová sonda měřidla bude vyvedena ven z MPB. Jednotlivé vodiče z AC sítě na vstupu do měřicího boxu jsou několik centimetrů odholeny a osazeny laboratorními banánky pro připojení. Tím bude zajištěno jednoduché připojení měřicí sondy. Zároveň díky umístění smart meteru vedle přívodu napětí z distribuční sítě je jednoduché přivedení fáze na vstup samotného zařízení.

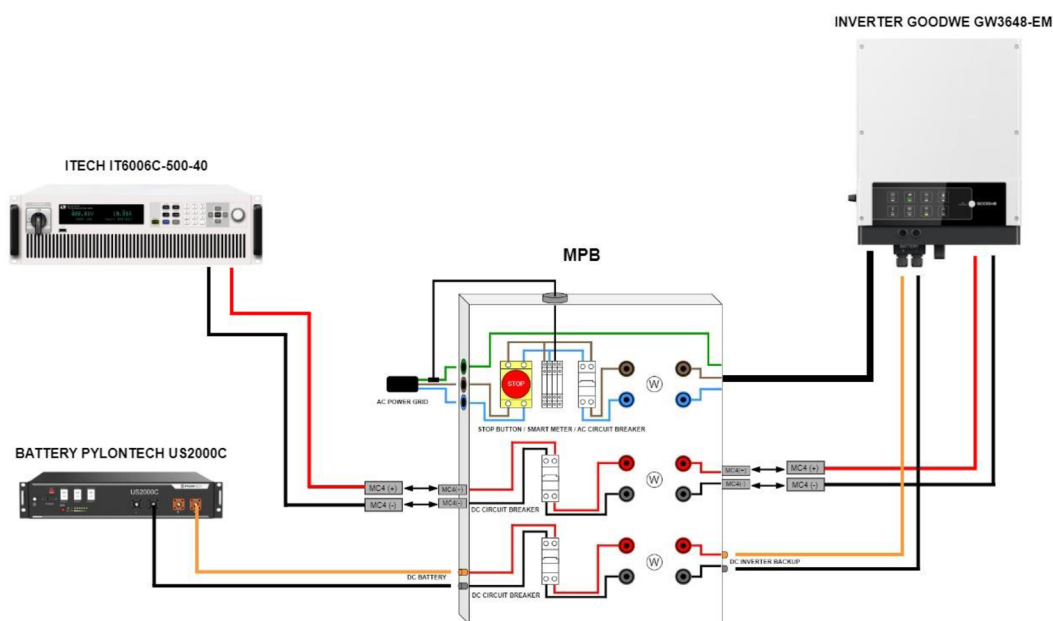
Jedním z prvků měřicího boxu pro tuto úlohu bude i 2P stop tlačítko. Díky zvolené koncepci zůstává PE zemnicí vodič napřímo připojen k systému a je tedy možné využít tohoto tlačítka pro simulaci odpojení systému od dodávky elektrické energie ze sítě. Díky přehlednému monitoringu v aplikaci PVMaster přímo od společnosti GoodWe je totiž snadné sledovat aktuální stav FVE, zároveň však i jednotlivé toky mezi prvky. Přístup do samotného monitoringu je především velmi snadný a rychlý. Schéma druhého měřicího boxu je na obrázku níže, stejně tak i blokové schéma celé úlohy.



Obrázek 20: Monitoring v aplikaci PVMaster



Obrázek 21: Měřicí box pro třetí úlohu



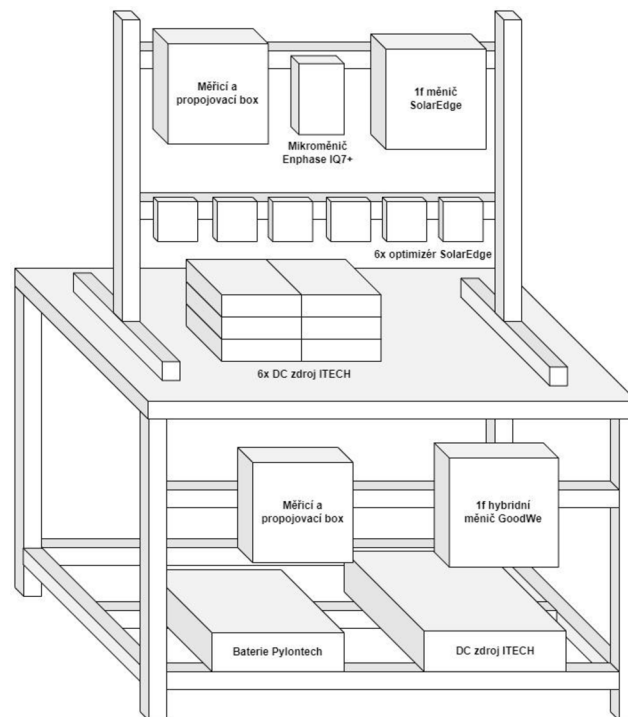
Obrázek 22: Blokové schéma třetí úlohy společně s MPB

Díky měřicímu boxu je zapojení úlohy mnohem snazší a rychlejší. Zároveň bude stanoviště během cvičení přehlednější a pro cvičícího MPB usnadní práci kontroly zapojení, případné diagnostiky. Hlavní výhodou je však podle mého názoru použití ochrany pro zvýšenou bezpečnost, možnost simulace odpojení od distribuční sítě a jednoduché měření jednotlivých obvodů.

## 6.6 Výsledná podoba pracoviště pro výuku

Samotné stanoviště je navrženo tak, aby s ním pracovala celá skupina studentů absolvující cvičení naráz. Tento koncept cvičení byl zvolen primárně z důvodu nedostatku některých komponentů. Bylo by tedy nemožné, aby v jeden moment fungovala stanoviště všech úloh v jeden moment. Skupinová práce neubere samotnému cvičení na přidané hodnotě a zjištěné poznatky budou srovnatelné.

I z tohoto důvodu však bylo nutné samotné stanoviště navrhout. Jako základ pro koncepci byl využit stojan pro první dvě úlohy (Obrázek 18) a provizorní zapojení třetí úlohy. Vznikl tedy koncept stolu, kde se ve spodní části nachází komponenty potřebné pro třetí úlohu. Na samotném stole je však umístěn již zmiňovaný stojan. Koncept a návrh výsledného stanoviště je znázorněn na obrázku níže (Obrázek 23).



Obrázek 23: Schéma finální podoby stanoviště v laboratoři



## 7 Závěr

Tato práce si dala za cíl vytvořit stanoviště pro výuku fotovoltaických systémů. Díky tomu by se měla zlepšit plynulost, přehlednost a bezpečnost samotného cvičení. Dle dostupných technologií na trhu bylo vybráno několik možných variant zapojení FV elektrárny. Ty se liší v množství jednotlivých prvků a jejich schopnostech. Prvním z těchto systémů je zapojení mikroměniče. To se řadí mezi nejjednodušší ze zvolených zapojení, a proto se jedná o ideální první krok do světa fotovoltaiky. Zde se studenti seznámí se základní podobou fotovoltaického systému. Následně bude možné přejít k druhé úloze. Zde se tentokrát jedná už o jednofázový měnič od společnosti SolarEdge, který pracuje za pomoci šesti výkonových optimizérů. Toto zapojení je již o něco složitější a posune povědomí studentů o FV elektrárnách. Pro úplné pokrytí dostupných technologií byla zvolena ještě třetí úloha. Ta je tvořena jednofázovým hybridním měničem GoodWe, který je propojen s bateriovým uložištěm Pylontech. Tento systém je jedním z těch pokročilejších a představuje formu fotovoltaické elektrárny, se kterou je možné se velmi často setkat i v reálném životě.

Dalším důležitým krokem bylo navrhnout a zrealizovat samotné stanoviště. Jeho hlavním účelem je přehledné pevné umístění jednotlivých prvků všech tří úloh. Zároveň však byly navrženy dva měřicí a propojovací boxy. Ty zastupují hned několik rolí. Těmi jsou například zvýšena ochrana všech zúčastněných za pomoci proudových ochran a zakrytí odhalených kontaktů, které jsou přímo pod napětím, snazší propojení jednotlivých prvků a jednodušší měření v různých částech systému díky konektorů pro připojení výkonového analyzátoru. Pasivně však budou tyto boxy i sloužit k tomu, aby bylo celé pracoviště během plnění úloh přehlednější a urovnanější. To poslouží nejen studentům k tomu, aby se v systému lépe orientovali a díky tomu i lépe pochopili celý princip fotovoltaické elektrárny. Zároveň však budou měřicí boxy usnadňovat cvičícímu případnou kontrolu nebo diagnostiku systému v případě chyb nebo nejasností.

Dále byl pro potřeby výuky vytvořen podrobný návod pro všechny tři jednotlivé úlohy. Návod obsahuje cíle daného cvičení, seznam použitých přístrojů pro tuto úlohu, její blokové schéma a podrobný návod, jak při zapojování postupovat. Návod zároveň slouží jako šablona protokolu, který bude následně během semestru odevzdáván za jednotlivá cvičení pomocí platformy E-learning.



Do budoucna je práce rozšiřitelná o vlastní řízení použitých DC zdrojů. Ovládání výstupních hodnot by bylo realizovatelné například pomocí softwaru Matlab, který je na Univerzitě hojně užíván. Ten přímo nabízí prostředí pro připojení a řízení přístrojů jako jsou například analyzátoři signálů, generátory funkcí nebo právě napájecí zdroje.

## Použitá literatura

- [1] Schéma zapojení hybridní solární elektrárny GoodWe EM. In: Solární Experti [online]. České Budějovice [cit. 2023-02-11]. Dostupné z: <https://www.solarniexperti.cz/solarni-systemy/fotovoltaika/hybridni-solarni-elektrarna-s-bateriemi-li-ion-354-kwp-na-klic/>
- [2] Boček, V. (2006). Sluneční energie. [online] Artemis.osu.cz. Dostupné z: <http://artemis.osu.cz/Gemet/meteo2/slune%C4%8Dn%C3%AD.htm> [cit.2023-03-31].
- [3] This Month in Physics History. April 25, 1954: Bell Labs Demonstrates the First Practical Silicon Solar Cell. [online] [cit. 2023-04-19] Dostupné z: <http://www.aps.org/publications/apsnews/200904/physicshistory.cfm>
- [4] Publi.cz. Konstrukce a výroba fotovoltaických článků a panelů. [online] Dostupné z: <https://publi.cz/books/91/03.html> [cit. 2023-03-31].
- [5] Jak funguje bifaciální solární panel. In: *IMobily.eu* [online]. [cit. 2023-02-11]. Dostupné z: <https://www.imobily.eu/risen-bifacial-500wp-oboustranny-solarni-fotovoltaicky-panel-30-let-zaruka-vykonu-35ks-paleta-25098.html>
- [6] Fotovoltaika: Nejpoužívanější pojmy ve fotovoltaice. Tzbinfo [online]. Ing. Bronislav Bechník, Ph.D., 2014 [cit. 2023-02-16]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/11772-nejpouzivanejsi-pojmy-ve-fotovoltaice>
- [7] *Mikroměniče* [online]. Svitavy: David Štička - fotovoltaické systémy, 2017 [cit. 2023-02-16]. Dostupné z: <http://www.sticka.cz/kategorie/mikromenice/>
- [8] GENIUS FVE. Jak vybrat baterii pro fotovoltaiku? [online]. [cit. 2023-03-31]. Dostupné z: <https://geniusfve.cz/2022/01/17/jak-vybrat-baterii-pro-fotovoltaiku/>
- [9] DSN SOLAR. 7 Most Popular Solar PV System Design and Simulation Software [online]. [cit. 2023-04-01]. Dostupné z: <https://cz.dsnsolar.com/info/7-most-popular-solar-pv-system-design-and-simu-34860210.html>
- [10] HLAD, Oldřich, PAVLOUSEK, Jaroslav. *Přehled astronomie*, 1984. 1. vydání. Praha: SNTL [cit. 2023-04-19]
- [11] ŠŮRI, M., CEBECAUER, T., HULD, T., DUNLOP, D. *Global irradiation and solar electricity potential – Czech Republic*, 2010. European Commission Joint Research Centre. [online] [cit. 2023-04-19] Dostupné z: <http://re.jrc.ec.europa.eu>.
- [12] Powering the Future. NASA Glenn Contributions to the International Space Station (ISS) Electrical Power System. [online] [cit. 2023-04-19] Dostupné Z: <http://www.nasa.gov/centers/glenn/about/fs06grc.html>
- [13] LIBRA, M. – POULEK, V.: *Fotovoltaická transformace energie*. Elektro 2/2010.
- [14] Úvod do FV systémů, [online] [cit. 2023-04-19] Dostupné z: <https://www.cne.cz/fotovoltaicke-systemy/uvod-do-fv-systemu/>
- [15] PYLONTECH akumulátor US2000C 2,4kWh. [online]. [cit. 2023-04-19]. Dostupné z: <https://www.fve-mp.cz/eshop/p/pylontech-akumulator-us2000c-0-246>.
- [16] ITECH IT-M3622 Regenerative Power System. In: *Altoo Measurement Science Aps* [online]. Horsholm [cit. 2023-04-16]. Dostupné z: <https://www.altoo.dk/ITECH+IT-M3622+Regenerative+Power+System+400W-+60V-+30A.html>

- [17] Reliable IQ 7+ solar power inverters | Enphase microinverters: IQ7+ Microinverter. In: *Enphase Solar Energy Pvt. Ltd.* [online]. Fremont [cit. 2023-04-16]. Dostupné z: <https://enphase.com/en-au/store/microinverters/iq7-series/iq7plus-microinverter>
- [18] GoodWe GW3648-EM. In: *FVE-MP s.r.o.* [online]. Slavkov [cit. 2023-04-17]. Dostupné z: <https://www.fve-mp.cz/eshop/p/hybridni-menic-goodwe-3648-em-0-68>
- [19] SolarEdge SE3500H-BEN4. In: *Memodo s.r.o.* [online]. Praha 7 [cit. 2023-04-16]. Dostupné z: <https://www.memodo.cz/stridace/solaredge/8129/solaredge-se3500h-ben4>
- [20] Smartmeter 3-fázový GoodWe. In: *ECO PRODUKT s. r. o.* [online]. Bratislava [cit. 2023-04-16]. Dostupné z: <https://ecoproduct.cz/p/85435-smartmeter-3-fazovy-goodwe-30571>
- [21] Optimizér výkonu 1100 MXM BT SolarEdge. In: *Bi Esse Cz s.r.o.* [online]. Plzeň [cit. 2023-04-16]. Dostupné z: [https://www.biesse.cz/fotovoltaika\\_c564938523279385/optimizer-vykonu-1100-mxm-bt-solaredge\\_p183185](https://www.biesse.cz/fotovoltaika_c564938523279385/optimizer-vykonu-1100-mxm-bt-solaredge_p183185)
- [22] Pylontech US2000C Lithium Ion Phosphate Battery 48V 2.4kWh. In: *VOLTACON UK LIMITED* [online]. Canley, Coventry [cit. 2023-04-16]. Dostupné z: <https://voltaconsolar.com/pylontech-us2000c-lithium-iron.html>
- [23] PV\*SOL. In: *Česká Fotovoltaická Asociace* [online]. Plzeň [cit. 2023-04-16]. Dostupné z: <https://www.cefas.cz/pv-sol/>
- [24] The Itech SAS1000 solar panel simulation software. In: *TTMS B.V.* [online]. The Netherlands [cit. 2023-04-16]. Dostupné z: <https://tt-ms.com/the-itech-sas1000-solar-panel-simulation-software/>

## Seznam příloh

|                                       |    |
|---------------------------------------|----|
| Příloha A: Návod k první úloze.....   | 55 |
| Příloha B: Návod ke druhé úloze ..... | 58 |

# Příloha A: Návod k první úloze

FAKULTA MECHATRONIKY,  
INFORMATIKY A MEZIOBŮROVÝCH  
STUDIÍ TUL



## Měření na mikroměniči

| Vypracoval / i | Datum měření | Datum vypracování |
|----------------|--------------|-------------------|
|                |              |                   |

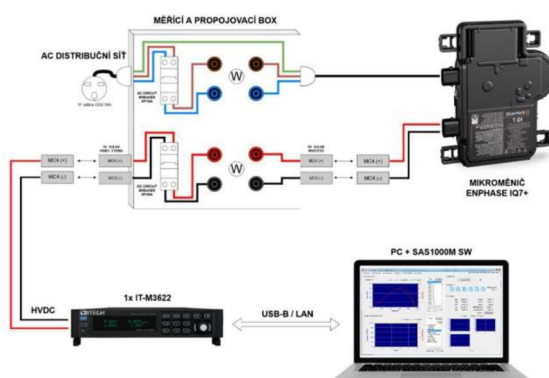
### Potřebná zařízení:

1. Mikroměnič Enphase IQ7+
2. DC zdroj ITECH IT-M3622
3. Měřicí a propojovací box (MPB)
4. PC se softwarem SAS1000M
5. Výkonový analyzátor

### Cíle měření:

1. Otestovat si zapojení mikroměniče
2. Vyzkoušet si práci s DC zdrojem a jeho řízení pomocí SW
3. Ověřit účinnost měniče podle normy EN 50530

### Blokové schéma úlohy:





## Příprava měření:

1. Zkontrolujte stav potřebných zařízení a prvků
2. Propojte pomocí vodičů s konektory MC4 mikroměnič a MPB
3. Připojte jeden kanál výkonového analyzátoru na DC stranu MPB, druhý kanál na AC stranu MPB
4. Zapojte AC vidlici z MPB do distribuční sítě
5. Propojte AC výstup mikroměniče s MPB
6. Propojte pomocí USB kabelu PC a DC zdroj
7. Propojte pomocí vodičů s konektory MC4 DC zdroj a DC vstup do MPB
8. Zapněte DC zdroj ITECH IT-M3622
9. Do PC zapojte flash disk s licenci pro software
10. Spusťte software SAS1000M

## První úloha:

1. Nastavte manuálně parametry panelu na:
  - $U_{oc} = [V]$
  - $I_{sc} = [A]$
  - $U_{MP} = [V]$
  - $I_{MP} = [A]$
  - $MPP = [W]$
2. Zaškrtněte možnost zapisování dat z měření do tabulky
3. Spusťte statické měření pomocí nastavených parametrů panelu
4. Z poznatků a naměřených dat vypracujte protokol viz. e-learning



---

### Druhá úloha:

1. Otevřete měření podle normy EN 50530
2. Postupujte podle jednotlivých kroků a úrovní, které jsou uvedené v normě
3. Nezapomeňte při každém měření logovat data do tabulky pro následné zpracování
4. Z poznatků a naměřených dat vypracujte protokol viz. e-learning

### Ve zbylém čase:

1. Vyzkoušejte si ostatní nastavení v programu SAS1000M
  - a. Například simulaci zastínění pro pohybu mraků po obloze
  - b. Měnit parametry panelu a sledovat chování měniče

## Příloha B: Návod ke druhé úloze

FAKULTA MECHATRONIKY,  
INFORMATIKY A MEZIOBOROVÝCH  
STUDIÍ TUL



### Měření na 1f měniči

| Vypracoval / i | Datum měření | Datum vypracování |
|----------------|--------------|-------------------|
|                |              |                   |

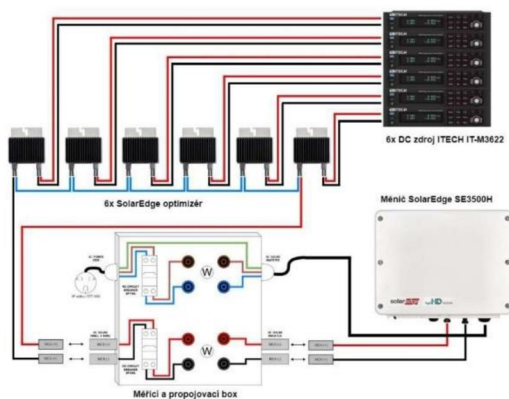
#### Potřebná zařízení:

1. Měnič SolarEdge SE3500H
2. 6x výkonový optimizér SolarEdge
3. 6x DC zdroj ITECH IT-M3622
4. Měřicí a propojovací box (MPB)
5. Výkonový analyzátor

#### Cíle měření:

1. Otestovat si zapojení měniče a optimizérů
2. Vyzkoušet si práci s DC zdrojem a jeho řízení pomocí SW
3. Ověřit účinnost měniče
4. Otestovat monitoring měniče

#### Blokové schéma zapojení:







## Postup měření:

1. Zkontrolujte stav potřebných zařízení a prvků
2. Propojte mezi sebou do série všech 6 výkonových optimizérů
3. Celou vzniklou sérii připojte pomocí konektorů MC4 do MPB
4. Jednotlivé optimizéry připojte k DC zdrojům
5. Zapojte AC vidlici z MPB do distribuční sítě
6. Připojte DC výstup z MPB do měniče pomocí vodičů s MC4 konektory
7. Připojte AC výstup z měniče do MPB
8. Připojte jeden kanál výkonového analyzátoru na DC stranu MPB, druhý kanál na AC stranu MPB
9. Zapněte jednotlivé DC zdroje
10. Manuálně nastavte výstupní hodnoty na:
  - $U = [V]$
  - $I = [A]$
11. Spusťte výstupy zdrojů
12. Na mobilním telefonu si stáhněte a otevřete aplikaci SetApp
13. Přihlašte se pomocí následujících údajů:
  - Mail: [pavel.jandura@tul.cz](mailto:pavel.jandura@tul.cz)
  - Heslo: SolarEdge1
14. Postupujte podle kroků v aplikaci a uveďte měnič do provozu
15. Sledujte stav systému v aplikaci a zároveň pozorujte chování zdrojů a jednotlivých kanálů analyzátoru
16. Po ustálení provozu měniče simulujte zastínění panelu. Na jednom ze zdrojů snižte o několik voltů výstupní napětí. Sledujte chování optimizérů a měniče a porovnejte vstupní a výstupní hodnoty s předchozími měřeními.
17. Z poznatků a naměřených dat vypracujte protokol viz. e-learning