

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE**

**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**



**Provozní vlastnosti fotovoltaických  
měničů s optimizéry**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**  
**Bc. Jakub Hlávka**

**Praha 2022**



# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Hlávka** Jméno: **Jakub** Osobní číslo: **466679**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra měření**  
Studijní program: **Inteligentní budovy**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Provozní vlastnosti fotovoltaických měničů s optimizéry**

Název diplomové práce anglicky:

**Operational characteristics of photovoltaic converters with optimizers**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Proveďte rešerši současného stavu poznatků v oblasti fotovoltaických měničů využívajících výkonové optimizéry.
- 2) Navrhněte sadu experimentů pro ověření vlastností min. dvou typů optimizérů.
- 3) Realizujte experimenty se zaměřením na vlastnosti fotovoltaické elektrárny při různé konfiguraci, zejména z pohledu stínění (s optimizéry, bez optimizérů,...).
- 4) Vyhodnoťte získaná data s ohledem na využití na budovách (stínění, bezpečnost) a navrhněte pravidla pro využívání optimizérů.

Seznam doporučené literatury:

- [1] REINDERS, Angèle. Photovoltaic Solar Energy: From Fundamentals to Applications. Chichester : John Wiley & Sons , Ltd., 2017.
- [2] TEODORESCU, Remus, LISERRE, Marco and RODRIGUEZ, Pedro. Grid converters for photovoltaic and Wind Power Systems. Chichester, U.K. : Wiley, 2011.
- [3] ELBASET, Adel A. and ABDELWAHAB, S. A.M. Performance analysis of photovoltaic systems with Energy Storage Systems. Cham : Springer, 2019.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**Ing. Pavel Hrzina, Ph.D. katedra elektrotechnologie FEL**

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

Datum zadání diplomové práce: **16.09.2022** Termín odevzdání diplomové práce: \_\_\_\_\_

Platnost zadání diplomové práce:  
**do konce zimního semestru 2023/2024**

Ing. Pavel Hrzina, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu literatury a zdrojů.

Dále prohlašuji, že nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu §60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze den .....

.....

podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji svému vedoucímu diplomové práce panu Ing. Pavlovi Hrzinovi, Ph.D. za vedení a odbornou pomoc s vypracováním diplomové práce. Ing. Václavu Zelenkovi za pomoc při realizaci experimentu a Ing. Martinu Vondráškovi za cenné rady.

## **Anotace**

Jméno autora: Bc. Jakub Hlávka  
Název diplomové práce: Provozní vlastnosti fotovoltaických panelů s měniči  
Akademický rok: 2022/2023  
Studijní program: Inteligentní budovy  
Katedra: Katedra elektrotechnologie  
Vedoucí DP: Ing. Pavel Hrzina, Ph.D.

## **Abstrakt**

Tato diplomová práce se věnuje problematice výkonových optimizérů pro solární moduly. V první části jsou vysvětleny funkce MPPT a DC/DC měniče, což jsou nedílné součásti funkce optimizérů. Následuje představení výrobců a konkrétních typů optimizérů, které se na našem trhu vyskytují nebo se dají dohledat v cizině.

Další část se již věnuje experimentálnímu ověření funkcí optimizérů. Nejprve je popsán návrh experimentu, následně jeho provedení a nakonec vyhodnocení. V závěru práce je pak doporučení pro využití různých druhů optimizérů pro různé druhy instalace.

### **Klíčová slova:**

Výkonový optimizér, fotovoltaika, PV modul, MLPE, DC/DC měnič

## **Abstract**

This thesis deals with the problem of power optimizers for solar modules. The first part explains the functions of MPPT and DC/DC converter, which are integral parts of the function of optimizers. This is followed by an introduction of manufacturers and specific types of optimizers that are available on our market or can be found abroad.

The next part is devoted to experimental verification of the optimizer functions. First the design of the experiment is described, then its execution and finally its evaluation. The paper then concludes with recommendations for the use of different types of optimizers for different types of installations.

### **Keywords:**

Power optimizer, photovoltaics, PV module, MLPE, DC/DC converter

# Obsah

1	Úvod .....	10
2	Cíle práce.....	10
3	Fotovoltaický článek .....	11
3.1	Voltampérová charakteristika fotovoltaického článku.....	12
4	Maximum Power Point Tracker .....	14
4.1	Technika hledání MPP (Perturb and Observe).....	15
5	DC/DC měniče .....	17
5.1	Buck měnič.....	17
5.2	Buck and boost měnič .....	18
5.3	NEC Rapid Shutdown .....	19
6	Optimizéry pro solární moduly .....	22
6.1	SolarEdge .....	23
6.1.1	P Series .....	25
6.1.2	S Series .....	26
6.1.3	SolarEdge Designer .....	27
6.1.4	SolarEdge monitoring.....	28
6.2	Huawei .....	29
6.2.1	SUN2000-375W .....	30
6.2.2	SUN 2000-450W-P.....	31
6.2.3	SUN 2000-450W-P2 W a SUN 2000-600W-P .....	31
6.2.4	Fusion Solar App .....	32
6.2.5	Huawei Smart Design.....	32
6.3	Tigo .....	34
6.3.1	TS4-A-O .....	35
6.3.2	TAP Design Tool.....	37

6.3.3	Tigo Energy Intelligence .....	38
6.4	Další výrobci .....	39
6.4.1	GNE .....	39
6.4.2	AMG Power Solutions.....	41
6.4.3	SOLARPOINT .....	42
6.4.4	SWT Power.....	43
6.4.5	SunGo .....	44
6.5	Porovnání výrobců optimizérů .....	45
7	Návrh experimentu .....	47
7.1	Měření pomocí venkovních panelů .....	47
7.2	Měření pomocí simulátoru TerraSAS 1000V/10 A .....	48
7.3	Měření na velkém solárním simulátoru.....	50
7.3.1	Měření voltampérové charakteristiky .....	52
7.3.2	Měření plně optimalizované soustavy .....	54
7.3.3	Měření bez optimizérů .....	63
7.3.4	Měření částečné optimalizace.....	63
7.3.5	Měření Rapid Shutdown .....	66
7.3.6	Vyhodnocení výsledků optimalizované soustavy.....	67
8	Pravidla pro používání optimizérů .....	72
8.1	Instalace na rodinných domech.....	72
8.2	Střešní instalace střední velikosti .....	73
8.3	Velká střešní instalace .....	73
8.4	Pozemní instalace.....	74
9	Závěr.....	75
10	Seznam použité literatury .....	76
11	Seznam obrázků.....	83
12	Seznam tabulek.....	85



13	Seznam grafů.....	86
----	-------------------	----

# 1 Úvod

Fotovoltaika je ve světě i u nás již zažitou a fungující technologií, jejíž rozmach u nás nastal mezi roky 2009 – 2010, díky výhodným dotačním titulům, snížení ceny technologií, ale hlavně fixací ceny vykupované energie z FVE. V současné době u nás i ve světě probíhá obdobný nárůst počtu instalací, a to hlavně díky zvýšení cen energií. Vzhledem k atraktivitě úspor se o fotovoltaike začíná uvažovat i na místech, kde nejsou optimální podmínky pro její umístění. Jedná se hlavně o střechy ať už rodinných domů, kanceláří, ale i větších výrobních závodů, či budov státní správy.

Právě na střechách budov častěji dochází k problémům s možným zastíněním, či nutnost řešení přísnějších požadavků požární bezpečnosti, než je tomu u FVE pozemních. Optimalizace výroby a vylepšení požární bezpečnosti jsou hlavní funkce výkonových optimizérů. Jejich užívání je tedy čím dál populárnější a někdy je i přímo vyžadováno projektantem jako nástroj pro zvýšení požární bezpečnosti. Optimizéry sebou však přinášejí i jistá negativa, jelikož to jsou další elektronická zařízení v systému s vlastní spotřebou a možností poruchy.

## 2 Cíle práce

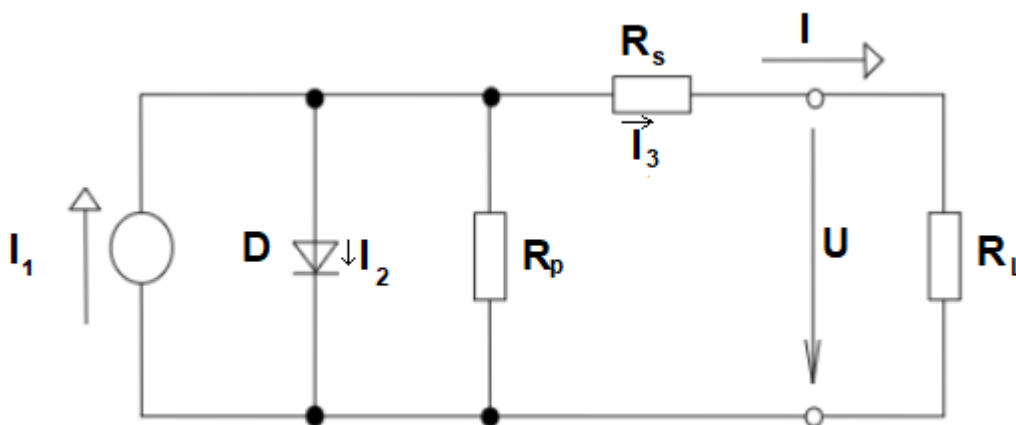
Cílem této práce je přiblížit problematiku výkonových optimizérů jak v teoretické rovině (řešerše současného stavu technologie výkonových optimizérů), tak experimentální. Během experimentu budou různé značky dynamicky zkoušeny simulací zastínění různých částí fotovoltaiického modulu za současného měření napětí a proudu na různých místech fotovoltaiické elektrárny. Z těchto dvou částí budou vyvozeny doporučení pro využití konkrétních značek optimizérů pro různé druhy instalací.

### 3 Fotovoltaický článek

Princip fotovoltaického článku je založen na fotovoltaickém jevu, při kterém dopadající elektromagnetické záření uvolňuje z látky elektrony. Absorbce je způsobena interakcí světla (fotonů) s částicemi hmoty (elektrony a jádry). V případě, že dopadající elektron reaguje s vázanými elektrony vznikají volné nosiče náboje.

Pro funkci fotovoltaického článku je důležité, aby touto reakcí vznikl pár elektron-díra. Pokud by k této reakci došlo v kovu, pak by došlo k okamžité rekombinaci a vzniklý náboj by se nedal z článku odvézt. Abychom tomu zabránili, využívá se pro tento účel polovodičů, ve kterých jsou elektrony a díry separovány vnitřním elektrickým polem PN přechodu.

Fotovoltaický článek je možno modelovat pomocí náhradního obvodu, který je na obrázku 1. Ozářená plocha ( $A_{\text{ill}}$ ) přechodu PN generuje proud o hustotě  $J_{\text{PV}}$ , přičemž oblast typu N se nabíjí záporně a typ P kladně. Tím dochází k polarizaci v propustném směru a část generovaného proudu teče zpět diodou D. Technologický postup přináší určité nedokonalosti přechodu PN, ty jsou modelovány svodovým odporem  $R_p$  a vliv odporu materiálu a proudových sběrnic je modelován sériovým odporem  $R_s$ . Výstupní napětí  $U$  na FV článku je nižší o úbytek napětí na sériovém odporu oproti napětí na diodě D.



Obrázek 1: Náhradní schéma fotovoltaického článku dostupné z [1]

Na základě popsaného náhradního schématu lze vyjádřit výstupní proud  $I$  rovnicí 3.1. Přičemž  $I_1$  [A] – generovaný proud,  $I_2$  [A] – proud diodou,  $I_3$  [A] – svodový proud. [1], [2]

$$I = I_1 - I_2 - I_3 \quad (3.1)$$

Po dosazení:

$$I = A_{ill}J_{PV} - I_1 \left[ \exp \left( e \cdot \frac{U+R_S I}{kT} \right) - 1 \right] - I_2 \left[ \exp \left( e \cdot \frac{U+R_S I}{2kT} \right) - 1 \right] - \frac{U+R_S I}{R_p} \quad (3.2)$$

kde:

$A_{ill}$  – ozářená plocha [ $m^2$ ]

$J_{PV}$  – prodouvá hustota ozářené plochy [ $\frac{A}{m^2}$ ]

$I_1$  – proud tekoucí diodou [A]

$U$  – výstupní napětí článku [V]

$I$  – výstupní proud článku [A]

$R_S$  – sériový odpor článku [ $\Omega$ ]

$R_p$  – paralelní odpor článku [ $\Omega$ ]

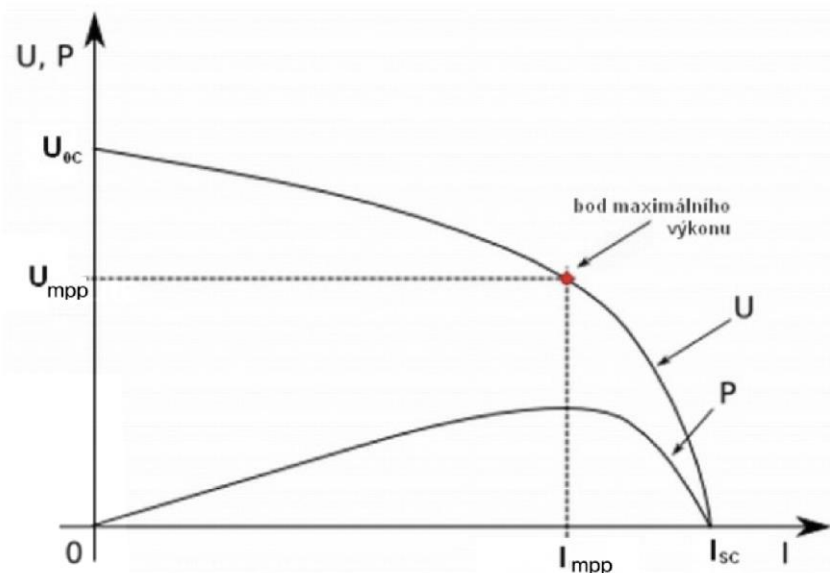
$T$  – termodynamická konstanta [K]

$k$  – boltzmanova konstanta [ $\frac{J}{K}$ ]

$n$  – koeficient respektující kvalitu diody z pohledu materiálového složení [–]

### 3.1 Voltampérová charakteristika fotovoltaického článku

Voltampérová charakteristika (VA) zobrazuje základní informaci o činnosti fotovoltaického článku. Hraniční veličiny na voltampérové charakteristice jsou proud nakrátko ( $I_{sc}$ ) a napětí naprázdno ( $U_{oc}$ ), přičemž proud nakrátko představuje maximální proud (zkratový proud), který může dodávat solární článek při dané intenzitě slunečního záření. Napětí naprázdno je maximální napětí na článku, kterého je možné dosáhnout v případě, že k článku není připojena žádná zátěž. Charakteristika je zobrazená v grafu 1.



Graf 1: Voltampérová charakteristika, dostupné z: [1]

Výkon solárního článku se dá vyjádřit jako součin proudu a napětí. Pro každý článek existuje tzv. bod maximálního výkonu (MPP) o napětí  $U_{mpp}$  a proudu  $I_{mpp}$ , což je pracovní bod na charakteristice, ve kterém je největší výstupní výkon. Výkon konkrétního fotovoltaického článku závisí na ozáření, na spektru světla a na teplotě článku. Výkon fotovoltaického článku lze zapsat rovnicí

$$P = U_{mpp} \cdot I_{mpp} \quad (3.1.3)$$

Další charakteristickou hodnotou je činitel plnění (FF – Fill Factor), podíl maximálního výkonu definovaného pomocí maximálního napětí a maximálního proudu a lze ho zapsat rovnicí

$$FF = \frac{U_{mpp} \cdot I_{mpp}}{U_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (3.1.4)$$

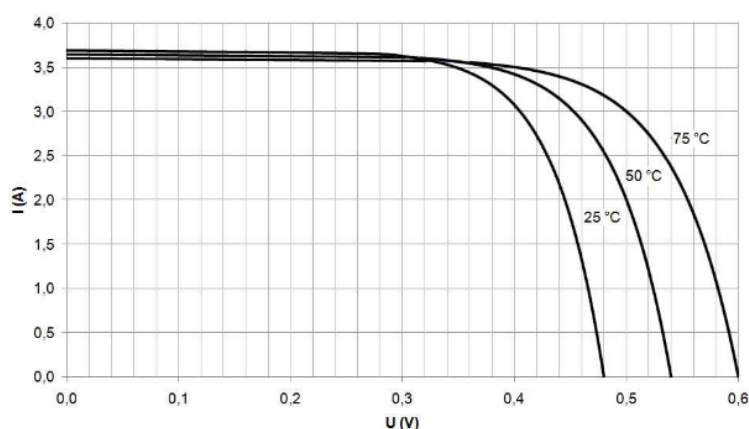
Účinnost, což je další charakteristická hodnota fotovoltaického článku je definovaná jako podíl maximálního výkonu článku v bodu MPP a výkonu dopadajícího slunečního záření. Lze ji zapsat rovnicí

$$\eta = \frac{U_{mpp} \cdot I_{mpp}}{P_{in}} \quad (3.1.5)$$

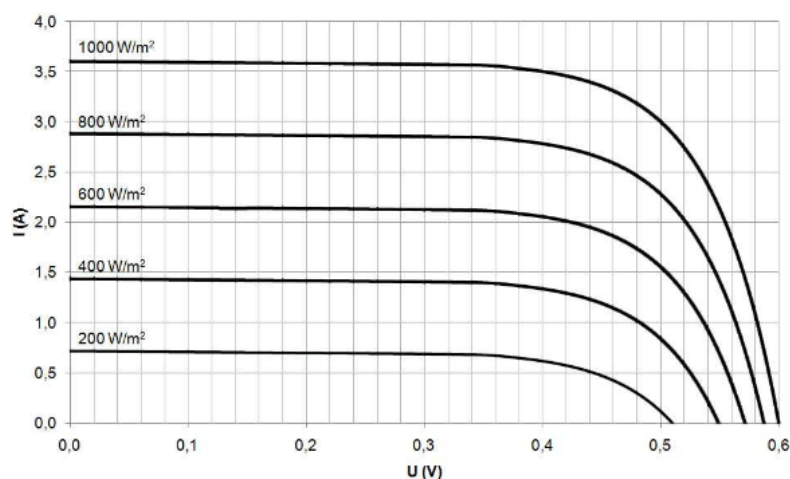
[2], [3], [4]

## 4 Maximum Power Point Tracker

Sledovač bodu maximálního výkonu neboli Maximum Power Point Tracker (MPPT) je zařízení, které zvyšuje výnos energie dostupné z FV modulu tím, že nepřetržitě sleduje MPP. Vzhledem k tomu, že je MPP závislé na intenzitě ozáření a teplotě, a ty se vlivem okolního prostředí mění neustále, musí se tento pracovní bod neustále sledovat, aby se za aktuálních podmínek získal, co největší výkon. Závislost výkonové charakteristiky na teplotě je na grafu 2 a na intenzitě ozáření na grafu 3. Zvýšení teploty článku zvýší maximální napětí a při snížení osvětlení se sníží proud.



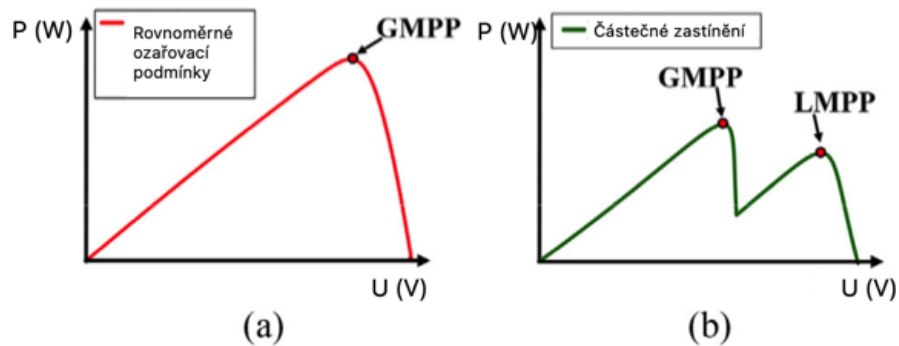
Graf 2: V-A Charakteristika za různých teplot, dostupné z: [2]



Graf 3: V-A Charakteristika pro různé intenzity ozáření, dostupné z [2]

Vzhledem ke konstrukci fotovoltaického modulu, kdy v případě že je částečně zastíněný např. od mraků, stromů či jiných objektů, je v některých případech možný vznik jednoho či více lokálních maxim (LMPP).

Problém lokálních maxim je, že algoritmus, který vyhledává MPP se může na tomto bodě zaseknout a díky tomu nenajde maximum globální (GMPP) neboli pravé maximum. Většina MPPT technik reaguje na změny jak ozáření, tak teploty a zařízení je obvykle součástí střídače nebo regulátoru výkonu, ale může být i samostatně. [2], [3], [4]



Graf 4: Výkonová charakteristika a) nezastíněná b) s dílčím zastíněním, dostupné z: [3]

#### 4.1 Technika hledání MPP (Perturb and Observe)

Jelikož se velikost výkonu a hodnota výstupního proudu mění nelineárně v závislosti na velikosti výstupního napětí a úrovni solárního ozáření, tak aby se z panelů získal maximální výkon, je nezbytné provozovat fotovoltaické pole při optimální úrovni napětí (UMPP). Nejpoužívanější metodou je právě „Perturb and Observe“. V doslovném překladu „odchýlení a vyhodnocení“. Algoritmus lze zapsat takto:

$$\frac{dP}{dU} \cong \frac{\Delta P}{\Delta U} \quad (4.1.1)$$

Je založen na změně pracovního napětí známým směrem a vyhodnocení derivace výkonu podle napětí. Polarita derivace výkonu podle napětí tedy rozhoduje o změně směru další změny pracovního napětí. Když vyjde derivace kladná, tak to znamená, že směr změny napětí je k dosažení MPP správný a další změna bude v téže směru.

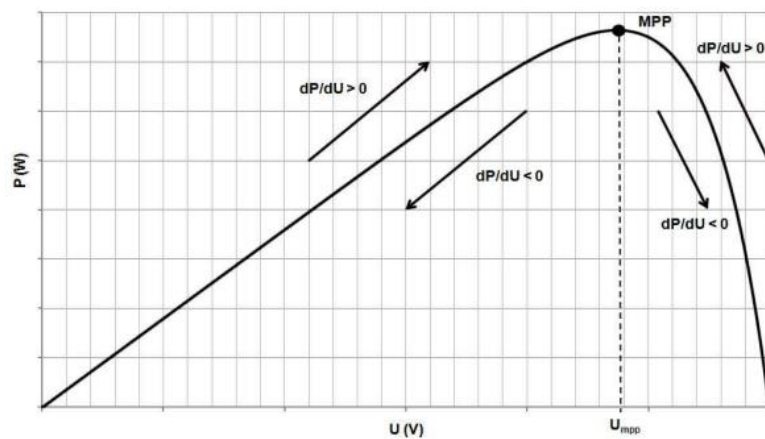
$$\frac{dP}{dU} \cong \frac{\Delta P}{\Delta U} > 0 \quad (4.1.2)$$

V případě, že je derivace záporná, tak udává, že změna napětí je ve špatném směru, tedy ve směru od MPP a další změna bude opačným směrem. Chování algoritmu je vidět v tabulce 1.

Tabulka 1: Chování algoritmu Perturb and Observe, dostupné z: [2]

Odchylka napětí U	Změna výkonu P	Následující odchylka U
+	+	+
+	-	-
-	+	+
-	-	+

Jak je patrné z grafu 5, tak na levé straně od MPP se zvyšováním napětí zvyšuje výkon, zatímco vpravo od MPP zvyšování napětí výkon snižuje.



Graf 5: Chování algoritmu, dostupné z: [2]

Nevýhodou této metody je oscilace kolem MPP. Když operační bod dosáhne velmi blízko k MPP, tak se algoritmus nezastaví a pertubace pokračuje v obou směrech. Oscilace může být minimalizována zmenšením perturbačního kroku, avšak menší velikost kroku zpomalí odezvu MPPT. Další možností je využít průměr několika hodnot nebo zvolit nerovnoměrný krok. [2], [5]



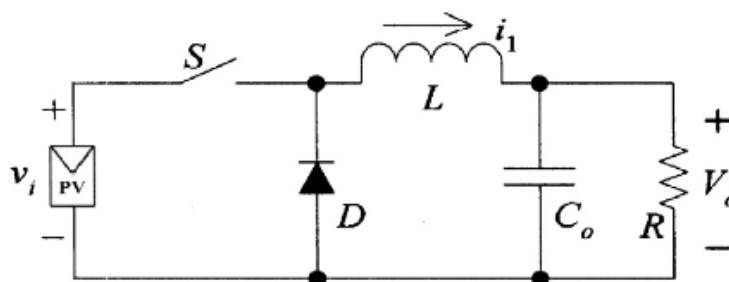
## 5 DC/DC měniče

Stejnosemřný měnič neboli DC/DC měnič je elektronické zařízení určené pro změnu velikosti stejnosměrného napětí. Lze je rozdělit dle využití na snižující (Buck), zvyšující (Boost) nebo invertující (Buck-Boost). V případě optimizérů pro fotovoltaické panely se využívá typu Buck (Huawei a Tigo) a typu Buck-Boost (SolarEdge). [57], [58], [59]

### 5.1 Buck měnič

Buck měnič nebo jinak nazýván step-down konvertor je stejnosměrný měnič, kdy napětí na výstupu je menší než napětí na vstupu. Tento typ je využíván například na nabíjení baterií nebo na regulaci v optimizérech na fotovoltaických panelech. Schéma měniče je vidět na obrázku 2.

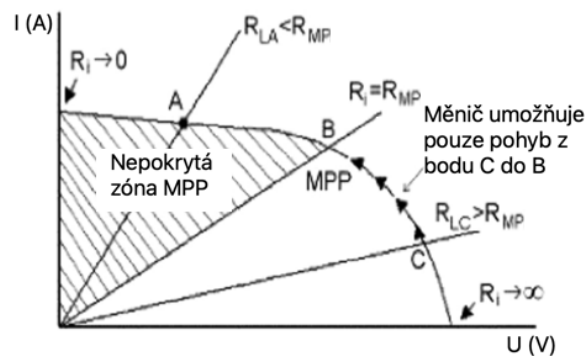
Lze ho popsat dvěma režimy, se sepnutým spínačem a rozepnutým spínačem. Spínač je na obrázku označený  $S$  a nejčastěji bývá realizován jako součástka typu MOSFET nebo IGBT. Ve chvíli, kdy je spínač měniče sepnutý, je napájecí zdroj připojen k obvodu a proud je do zátěže dodáván přes cívku  $L$ . Cívka se v tomto režimu chová jako spotřebič a je na ní úbytek napětí a tím se do ní ukládá energie. Během této doby se proud na cívce zvýší, z minimální na maximální hodnotu. Sledování této hodnoty je většinou úkolem zpětnovazebního řízení měniče, které není na obrázku 2 pro přehlednost znázorněno. Dioda  $D$  je v závěrném směru, tudíž přes ní proud neprotéká. Současně se nabíjí kondenzátor  $C$  a napětí na něm se zvyšuje. Velikost výstupního napětí může dosáhnout maximálně hodnoty vstupního napětí.



Obrázek 2: Schéma Buck měniče, dostupné z: [6]

Ve druhém režimu, kdy se spínač rozezne se odpojí vstupní napětí. Cívka se začne chovat jako zdroj a snaží se udržet směr a velikost proudu  $i_1$ , polarita napětí se obrátí. K tomu proudu se přičte proud kondenzátoru C, který se začne vybíjet. Obvod se uzavře přes diodu D v propustném směru. V tomto režimu výstupní napětí klesá.

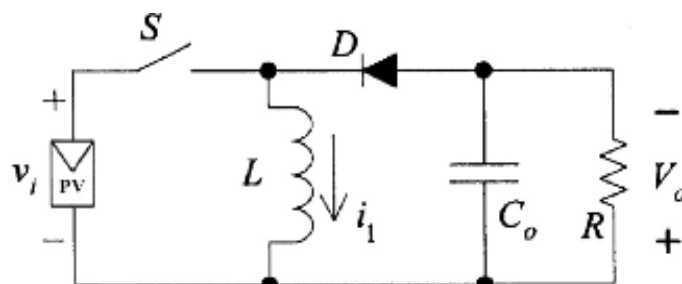
Impedance na vstupu a na výstupu jsou označeny jako  $R_i$  a  $R$ . Změnou časování pracovního cyklu (duty cycle) lze měnit výstupní impedanci a dosáhnout sladění s optimálním odporem panelu pro maximální přenos výkonu. Jelikož, lze “duty cycle“ měnit pouze mezi nulou a jedničkou, je vstupní odpor pouze mezi odporem zátěže a nekonečnem. Z tohoto důvodu Buck měnič nedosahuje hodnot vyšších než  $I_{MP}$  fotovoltaického modulu. MPP tracking je omezen na oblast, kde  $R$  je větší nebo rovno  $R_{MP}$ . [2], [6], [7]



Graf 6: Oblasti trackingu pro Buck měnič, dostupné z: [6]

## 5.2 Buck and boost měnič

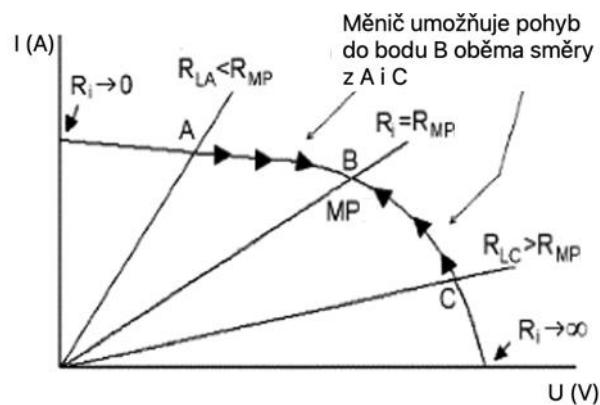
Buck and boost měnič, neboli invertující měnič, je typ DC-DC měniče, který schopen generovat větší nebo menší napětí, než je vstupní napětí. Topologie zapojení je znázorněna na obrázku 3.



Obrázek 3: Schéma Buck-boost měniče, dostupné z: [6]

Po sepnutí spínače S (tranzistor), začne cívkou L procházet proud a ta se opět chová jako spotřebič a začne kumulovat energii. Proud na cívce v té době vzroste minimální na maximální. Po rozepnutí spínače se nakumulovaná energie magnetického pole mění na indukované napětí a proud, který nabíjí kondenzátor  $C_0$ . Diode D zabraňuje, aby při rozepnutém spínači nedocházelo k vybíjení kondenzátoru  $C_0$  přes cívku L. Velikost výstupního napětí se reguluje poměrem doby sepnutí a rozepnutí spínače.

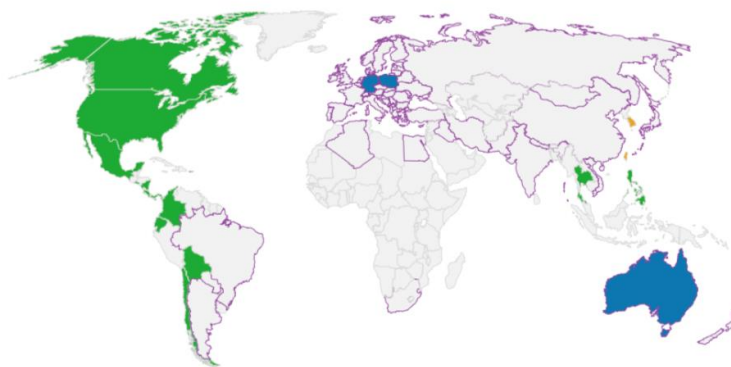
Vzhledem k tomu, že buck-boost měnič vzniká kaskádováním buck měniče a boost měniče, může sledovat MPP v celé charakteristice fotovoltaického panelu bez ohledu na odpor zátěže a atmosférické podmínky. Vstupní odpor měniče se pohybuje od nuly do nekonečna, což umožňuje provozní pohyb po celé křivce UI. [2], [6], [7]



Obrázek 4: Oblasti trackingu pro Buck-boost měnič, dostupné z [6]

### 5.3 NEC Rapid Shutdown

Rapid Shutdown (RS) je bezpečnostní požadavek pro elektrické zařízení, který byl původně zaveden ve Spojených státech amerických v National Electrical Code (NEC). Tento požadavek se vztahuje na solární fotovoltaické systémy a vyžaduje způsob, jak vypnout nebo snížit napětí solárních modulů na střeše všech nových rezidenčních a komerčních budov. Podobné požadavky se začínají vyžadovat i v jiných zemích po celém světě. Na obrázku 5 jsou vidět země, které normu užívají (zeleně), nebo mají podmínky podobné (modře).

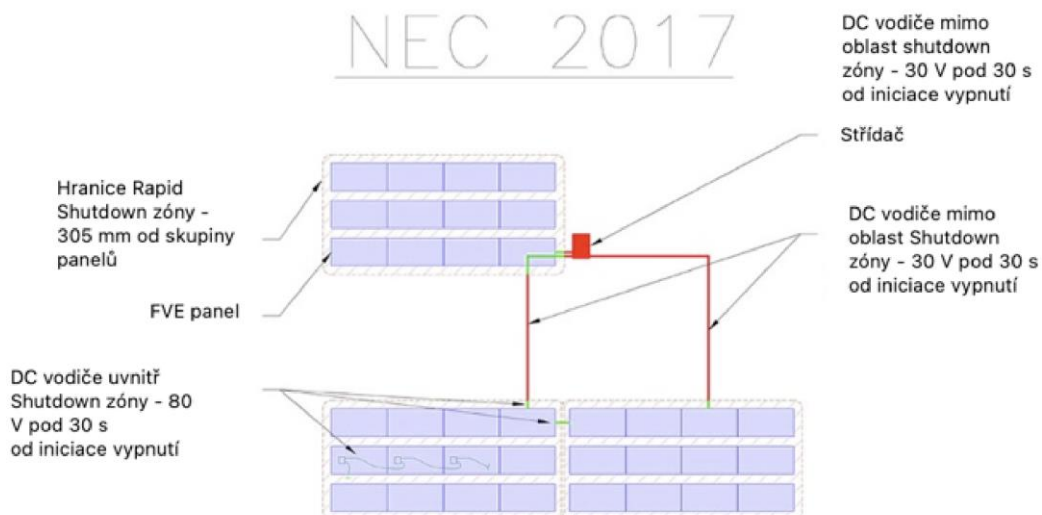


Obrázek 5: Země, které vyžadují podobná kritéria jako NEC Rapid shutdown, dostupné z [8]

Do roku 2017 stačilo, aby se střídač vypnul a tím se energie vygenerovaná fotovoltaickými moduly nedostala dále za něj. Od roku 2017 však platí nové požadavky, které vyžadují, aby došlo k vypnutí na úrovni modulu. I přes vypnutí střídače totiž panel stále vytváří napětí na vodičích mezi panely a střídačem, a to komplikuje práci Hasičskému záchrannému sboru v případě požáru. Tehdy může dojít k poranění, např. při prořezávání střechy.

RS systém se skládá ze 3 částí. První je tzv. Rapid Shutdown Device (RSD). Je to typ module-level power electronic (MLPE) nebo mikroměniče, které se instalují na zadní stranu solárních panelů. Jsou vybaveny technologií, která dokáže vypnout nebo snížit napětí, aby byly dodrženy předpisy pro rychlé vypnutí fotovoltaiky. Požadavky jsou snížení v RS oblasti (vzdálenost 305 mm od skupiny panelů ve všech směrech) na maximálně 80 V za 30 s a mimo oblast na 30 V za 30 s, jak je vidět na obrázku 6. MLPE mohou být jednoúčelové zařízení pouze s funkcí RS, např. Tigo TS4-A-F, nebo mohou mít funkcí více, jako je to u optimizérů.

# NEC 2017

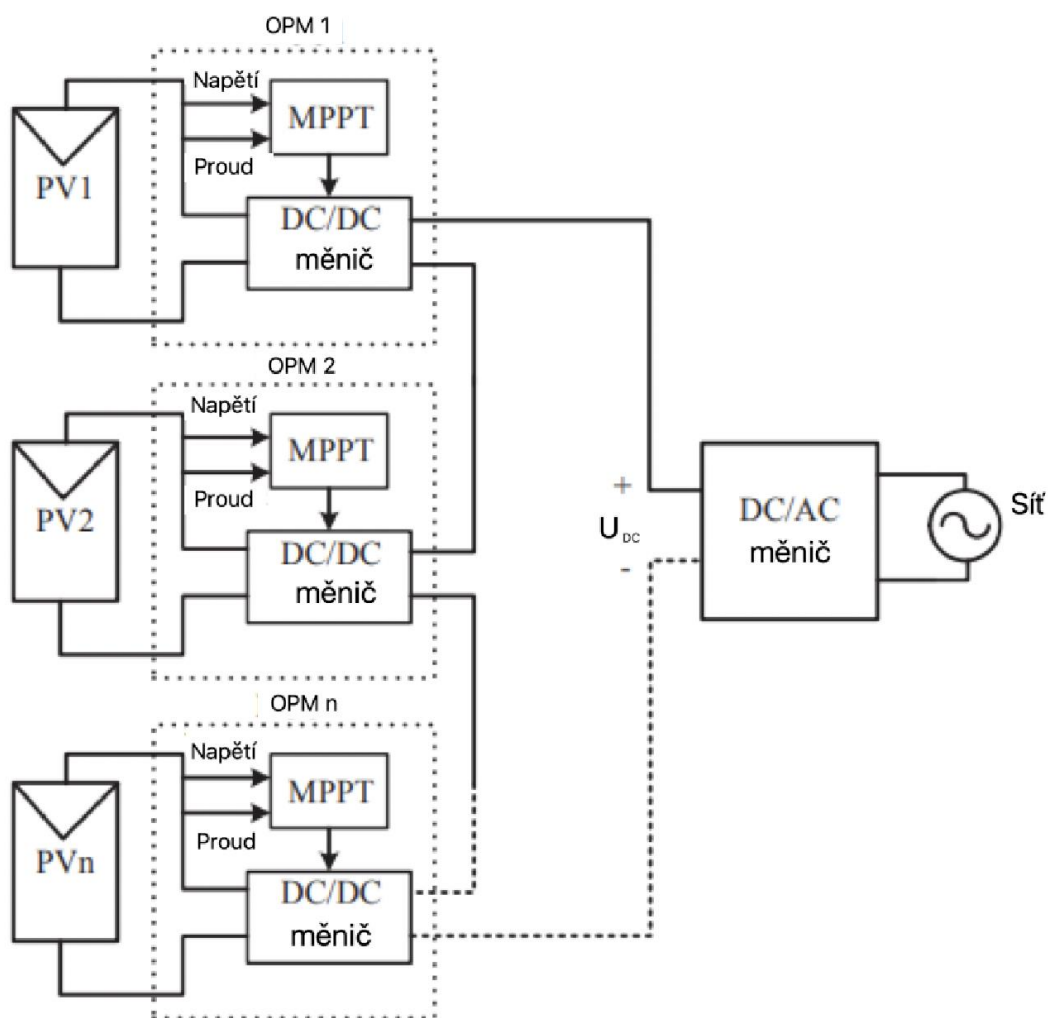


Obrázek 6: Schéma požadavků na Rapid shutdown NEC 2017, dostupné z [9]

Druhým komponentem je iniciátor vypnutí. Zařízení má nejčastěji podobu tlačítka nouzového zastavení. RS může být spuštěn zmáčknutím tlačítka nebo automaticky ztrátou napájení ze sítě. V neposlední řadě je potřeba střídač. Velké množství střídačů má již iniciátor RS instalován uvnitř. Tyto tři komponenty se nazývají Photovoltaic Rapid Shutdown Equipment (PVRSE). [8], [9]

## 6 Optimizéry pro solární moduly

Optimizéry (OPM) jsou druh MLPE, jsou to DC/DC měniče, které se instalují na nejčastěji jeden, dva anebo více solárních modulů v sérii, či paralelně. Mají zajišťovat, že každý modul, a tedy i celý systém, pracuje na optimálním operačním bodě. V typické instalaci jsou optimizéry napojeny na moduly a mezi sebou v sérii (string), a následně jsou spojeny se stringovým střídačem. Počet těchto zařízení v jednom stringu závisí na konkrétním typu. Ve všech případech je však navrženo tak, aby velikost napětí na výstupu z optimizérů odpovídala hodnotám mezi startovací a maximální hodnotou střídače. Navržený výkon optimizérů kopíruje nabídku fotovoltaických modulů, přičemž rozptýlenou vybraných výrobců (SolarEdge, Huawei, Tigo) se pohybuje od 300 W (SolarEdge P300) po 1200 W (SolarEdge S1200).



Obrázek 7: Typické zapojení optimizérů, dostupné z [10]

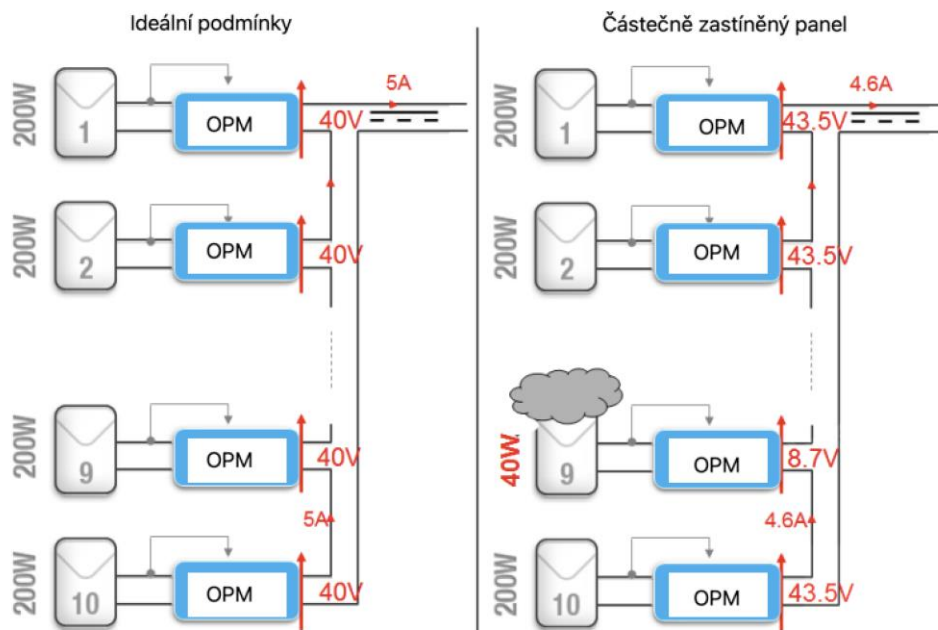
Typické funkce optimizéru jsou lokální MPP-Tracking pro každý modul, odpojení modulu na limitní napětí v případě poruchy (Rapid Shutdown) a monitoring na úrovni jednotlivého modulu.

Optimizéry mají také jisté nevýhody. Jsou to další elektronická zařízení, takže sami o sobě spotřebovávají elektrickou energii a dále na nich vznikají další ztráty na vedení. Při jejich využití se systém zesložituje, jelikož se do systému přidávají jako další komponenty, které se mohou porouchat. Porucha, může vést k požáru nebo porušení stringu a snížení produkce elektrické energie.

V Čechách se v současnosti nejčastěji využívají tři značky optimizérů (SolarEdge, Huawei, Tigo). Některé pracují v uzavřeném ekosystému, kdy optimizéry a střídač musí být od stejného výrobce. Jiné fungují na univerzálním přístupu, kdy se dají připojit téměř ke všem střídačům. [10],[11]

## 6.1 SolarEdge

Optimizéry od SolarEdge (SE) patří do skupiny s uzavřeným systémem, ale po určitou dobu nabízeli i řešení, kdy šlo některé funkce využít i na střídačích jiných značek. Optimizéry mají Buck and boost měnič, mohou tedy napětí zvyšovat nebo snižovat. Ve chvíli, kdy se modul částečně zastíní, změní se výkon soustavy a aby střídač udržel napětí stejné na DC vstupu střídače, změní se na stringu proud. Optimizéry chtějí tento proud udržet a zastíněný optimizér sníží napětí, aby se proud na tuto hodnotu zvýšil, zatímco ostatní optimizéry mohou napětí zvýšit, aby naopak proud snížili. Funkce změny napětí a proudu je vidět na obrázku 8.



Obrázek 8: Koncept funkce optimizérů SolarEdge, dostupné z: [57]

Ačkoliv má výrobce svoje stránky celkem pečlivě a přehledně zpracované, zákazník si nemůže jednoduše napřímo jejich produkty zakoupit. V případě zájmu musí využít služby distributorů jako je Memodo s.r.o., Krannich Solar s.r.o. Votum s.r.o., Solarity s.r.o a další. Existují však i výjimky, kdy větší firmy, jako např. ČEZ ESCO a.s., nakupují přímo od výrobce.

Dostupnost informací o produktech u SolarEdge je na vysoké úrovni. Přímo na jejich stránkách mají „Service center“, kde se nacházejí datasheety, instalační manuály, servisní manuály, certifikáty, školicí materiály atd. Všechny tyto informace jsou zdarma a není nutné si vytvářet žádný klientský účet. Soubory jsou ve 12 světových jazycích, avšak, čeština mezi nimi není. Některé soubory se však v češtině dají dohledat na stránkách českých distributorů, ale povětšinou se to týká pouze datasheetu a instalačního manuálu. SolarEdge má také svůj Youtube kanál (SolarEdgePV), kde je k nalezení kromě marketingových sdělení, také velké množství video-návodů, které usnadňují návrh, realizaci a následně správu zapojení. Neposlední v řadě, je dostupná také „Edge Academy“, kde lze po registraci využít tréninkových programů, které jsou zdarma. Pro registraci je nutné zadat jméno firmy a IČO, registrace tedy není umožněna fyzickým osobám. SE nabízí střídače o výkonu od 2,2 kW do 120 kW. [12], [13], [14], [15]



### 6.1.1 P Series

Od této řady se v době psaní této práce pomalu odstupuje a nahrazují je modely série S. Výrobce rozděluje optimizéry dle výkonu na rezidenční (P370 až P601) a komerční (P605 až P1100) použití. Celkově se jedná o 19 základních typů dle velikosti výkonu optimizérů.

Optimizéry s technologií „IndOP™“ mají v názvu modelu I např. P401I. Tyto modely lze na rozdíl od ostatních připojit v konfiguraci se střídači od jiných výrobců. Využití funkce optimizéru (optimalizace, Rapid Shutdown, monitoring, možnost projektování delších stringů) závisí na využití jednotky SMI (Safety Monitoring Interface).



Obrázek 9: SolarEdge SMI jednotka, dostupné z [13]

Jednotka při použití umožňuje všechny funkce krom projektování delších stringů. Při návrhu stringů se musí vycházet z návrhu konkrétního použitého střídače a panelů a minimální počet optimizérů, např. pro P401I je 4. V případě použití jednofázového střídače SolarEdge je rozsah 8-25 optimizérů při maximálním výkonu v závislosti na modelu a u třífázového je 16-50 optimizérů na string. Ve variantě použití pouze optimizérů bez SMI jednotky fungují optimizéry pouze jako MPP trackery pro každý modul, a tedy pouze zvyšují výtěžnost panelů, jak je vidět v tabulce 2.

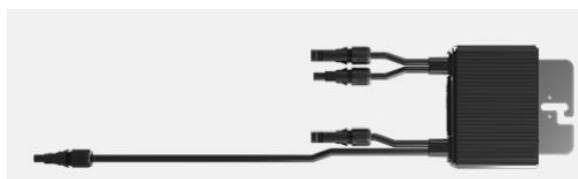
Tabulka 2: Porovnání funkcí při různých zapojeních

	<b>Optimizér SolarEdge + střídač SolarEdge</b>	<b>Optimizér SolarEdge + SMI jednotka + střídač jiného výrobce</b>	<b>Optimizér SolarEdge + střídač jiného výrobce</b>
<b>Optimalizace</b>	+	+	+
<b>Rapid Shutdown</b>	+	+	-
<b>Monitoring</b>	+	+	-
<b>Projektování členitých instalací</b>	+	+	+
<b>Projektování delších stringů</b>	+	-	-

V době psaní této práce však nebylo možné zjistit podporované modely střídačů, jelikož stránka: <https://www.solaredge.com/articles/se-supported-devices> je aktuálně nedostupná. [15], [16]

### 6.1.2 S Series

Optimizéry řady S byly představeny na konci roku 2021 a v současné době pomalu nahrazují řadu P. Jsou navrženy jako uzavřený systém a pracují tedy pouze se střídači SolarEdge. Oproti řadě P jsou zde pouze 3 modely, konkrétně S440, S500 (určeny pro rezidenční využití) a S 1200 (určeny pro komerční využití). S440 a S500 mají maximální vstupní napětí 60 V, proud 14,5 A a 14 A, výkon 440 W a 500 W. Rozsah pro MPPT je 8-60V a nejvyšší možné napětí systému je 1000 V. Počet optimizérů na string je minimálně 8 až 18 a maximálně 25 až 50 v závislosti na použitém střídači. Model S500 má verzi S500B, která je určena pro bifaciální moduly. S1200 má potom maximální vstupní výkon, napětí (1200 W, 125 V). Podporuje připojení dvou modulů v sérii k jednomu optimizéru a minimální počet optimizérů na string je 14 až 15 a maximální je 30. Optimizér má také údaj o minimálním (27 až 29) a maximálním (60) počtu připojených modulů na string. Záruční doba na všechny modely optimizérů je 25 let. [16], [17]



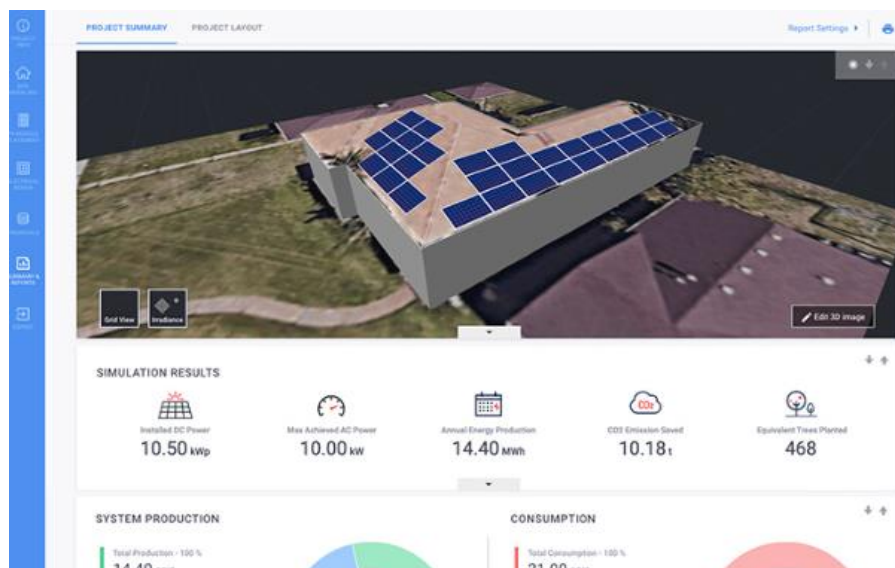
Obrázek 10: Optimizér SolarEdge serie S, dostupné z: [12]

### 6.1.3 SolarEdge Designer

„SolarEdge Designer“ je software vytvořený společností SolarEdge pro navrhování fotovoltaických elektráren pomocí komponentů od SolarEdge (střídače, optimizéry a baterie). Program je tzv. web-based, což znamená, že běží v internetovém prohlížeči, a tudíž není nutná instalace. Nevyžaduje licenci ani jiné poplatky, avšak k přístupu je nutné při registraci, kromě osobních údajů, i jméno společnosti a IČO. Pro fyzické osoby je tedy možná registrace pouze do monitorovací části po vpuštění instalačním technikem. V případě, že byla společnost do systému již jednou registrována, tak správce účtu musí do firemního účtu dalšího uživatele přidat, což může u větších společností vést ke komplikacím.

Software využívá satelitní mapu od Google, ale lze nahrát i svojí fotografii místa instalace a program jí pomocí orientačních bodů překryje základní mapu. Do mapy se následně může vymodelovat 3D model požadovaných budov, které se osadí panely. Databáze modulů je rozsáhlá a pokud požadovaný modul není v nabídce, tak ho lze dodat. Designer má meteorologická data z předem předdefinovaných stanic, ale je možné do něj i nahrát CSV soubor s hodinovými meteorologickými daty. Soubor musí obsahovat globální horizontální záření, difúzní horizontální záření a teplotu okolí.

Stringy lze vygenerovat automaticky, či manuálně vzhledem ke zvolené strategii návrhu. Nově je také možnost přidat akumulaci, která se automaticky navrhuje po zadání spotřeby objektů. V neposlední řadě je vygenerována shrnující zpráva s informacemi o navržené elektrárně (instalovaný DC výkon, maximální dosažitelný AC výkon, roční výroba energie, úspora CO<sub>2</sub>, průběh výroby za měsíc atd.) Model rozložení panelů lze také exportovat do monitorovací platformy ke zjednodušení čtení dat, např. v případě poruchy na modulu, lze z mapy snadno vyčíst, o který panel a modul se jedná a následně ve skutečné elektrárně kontrolovat pouze konkrétní modul. [20], [21]



Obrázek 11: SolarEdge designer, dostupné z [21]

#### 6.1.4 SolarEdge monitoring

Monitorovací platforma od SolarEdge se nazývá „SolarEdge monitoring“. Je přístupná jak v prohlížeči, i jako aplikace pro Android a iOS. Funkce aplikace se liší dle přístupu na „Instalační“ a „Uživatelské“. Založení elektrárny, případně celkového účtu provede instalační pracovník při nastavení FVE. Uživatelé (vlastníci FVE) umožní přístup instalačnímu pracovníkovi. On určí, jaké funkce uživateli zpřístupní. Základní funkce jsou informace v záložce „Dashboard“ a „Layout“. V „Dashboard“ jsou nejdůležitější informace o elektrárně jako takové, jak je vidět na obrázku 12. V záložce „Layout“ je pak vidět rozložení panelů a s tím spojený údaj o vyrobené energii až na úrovni modulů.

Instalační pracovník má interface rozšířený o záložky „Charts“, „Reports“, „Alerts“, „Admin“. „Charts“ umožňuje zobrazit další informace o FVE až na úrovni modulů. „Reports“ umožňuje vygenerovat zprávy ohledně celkově vyrobené energie za konkrétní období, stav lokality, analýzu výkonu a další. V „Alerts“ se zobrazují chyby systému, jako např. chybný optimizér či modul.



Obrázek 12: Dashboard SolarEdge monitorovací platformy, dostupné z: [48]

## 6.2 Huawei

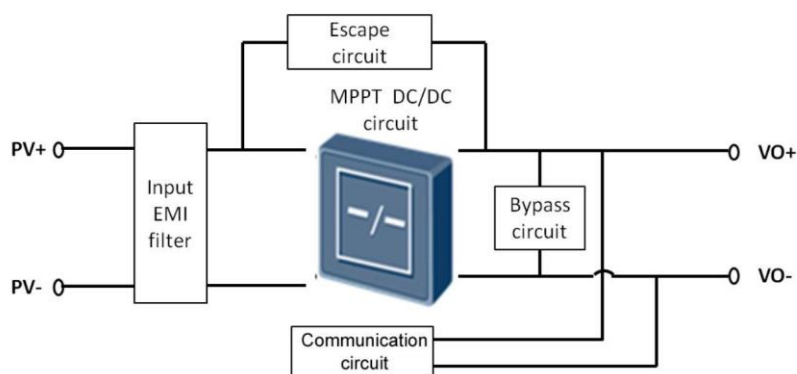
Optimizéry od Huawei (HU) jsou určeny výhradně k použití se střídači od Huawei, jedná se tedy o uzavřený systém. Mají Buck měnič, a tudíž umí napětí pouze snižovat. V případě zastínění modulu snižují napětí, aby udrželi stejný proud jako je na stringu až do chvíle, kdy je modul natolik zastíněný, že to není možné a následně se optimizér přepne do režimu bypass, aby svým zapojením v sérii neomezoval ostatní moduly (optimizéry).

Hlavní dodavatel pro střední a východní Evropu je společnost Photomate s.r.o., a lokální distributoři pro český trh jsou Solarity s.r.o., GBC Solino s.r.o. a mylux s.r.o. Huawei v době psaní práce nabízí pouze jeden model optimizéru SUN2000-450W-P, který je nástupce modelu SUN2000-375W. V blízké době má přijít na trh modernizovaná verze SUN 2000-450W-P2 a SUN 2000-600W.

Scénáře využití se liší dle modelu. Společnost má obdobně jako konkurence svůj vzdělávací portál „iLearningX“, který však není určen pouze fotovoltaice, ale celému portfoliu produktů Huawei. S tímto portálem je občas problém, že školení o fotovoltaice je ve formě prezentací a na videa jsou pouze odkazy na YouTube kanál „Huawei FusionSolar“, které pro systém MacOS nefungují. [22]

### 6.2.1 SUN2000-375W

Model optimizéru, jehož prodej skončil, bylo možné použít v konfiguraci pouze optimizér a střídač, ale v tomto zapojení nebylo možné využít všechny funkce optimizéru (optimizér zajišťoval pouze funkci MPPT na úrovni modulu). Aby se dosáhlo zbylých funkcí (Rapid Shutdown, monitoring na úrovni modulů) museli být připojeny skrze Huawei Safety Box, který zprostředkoval komunikaci se střídačem pomocí RS485. Nejvyšší povolené napětí, proud a výkon na vstupu je 80 V, 12 A a 375 W. Rozsah provozního napětí MPPT je 10-80 V. Odolnost proti prachu a vodě je IP 68. Maximální povolené napětí na stringu je 1000 V. Záruka od výrobce byla 25 let. [40],[47]



Obrázek 13: Diagram optimizéru SUN 2000P-375W, dostupné z [47]

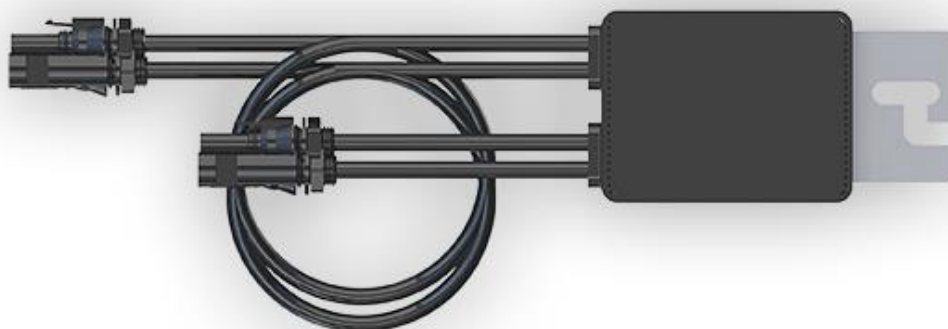


Obrázek 14: Huawei Safety box dostupné z: [40]

## 6.2.2 SUN 2000-450W-P

Současně prodávaný model SUN 2000-450W-P má všechny funkce jako jeho předchůdce SUN 2000-375W, avšak již nepotřebuje k jejich využití Safety box. Ke komunikaci se střídačem využívá pouze DC kabelu. Komunikační protokol je DC MBUS. Optimizér pracuje s maximálním vstupním výkonem, napětím a proudem (450 W, 80 V a 15 A). Odolnost proti vodě a prachu je IP 68. Datasheet neuvádí maximální povolené napětí na stringu jako u starší verze, ale místo toho je informace o maximálním a minimálním počtu optimizérů na string. Počet závisí na konkrétním střídači, ale minimální počet je 4-6 optimizérů a maximální je 25-50. Rozsah napětí MPPT je 8-80 V. Záruka na zařízení je 25 let. Maximální podporovaný výkon střídače je 40 kW.

[42], [44]



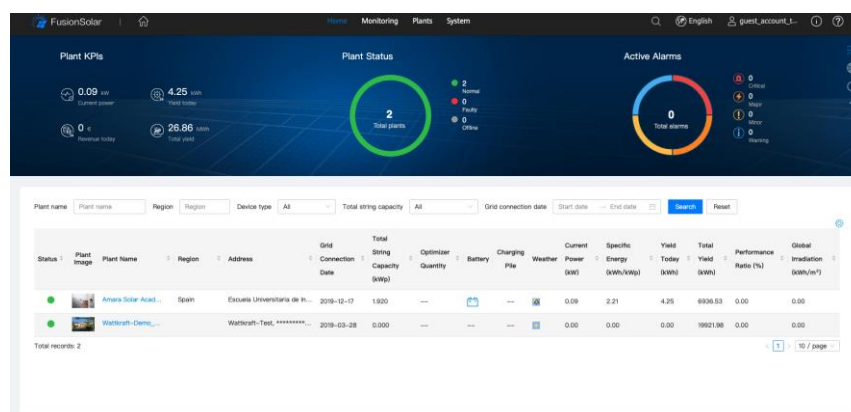
Obrázek 15: Huawei SUN 2000-450P optimizér dostupné z: [41]

## 6.2.3 SUN 2000-450W-P2 W a SUN 2000-600W-P

Nejnovější optimizéry od Huawei jsou SUN 2000-450W-P2 a SUN 2000-600W-P, informace o nich již lze najít, ale v době psaní práce se ještě neprodávají. Optimizéry mají maximální vstupní výkon 450 W a 600 W. Maximální vstupní napětí je 80 V a proud je 14,5 A. Komunikační protokol je DC MBUS a stupeň ochrany je IP 68. Rozsah MPPT je 10 - 80 V. Minimální a maximální počet optimizérů na string se liší dle zvoleného střídače (minimálně 4 – 6 a maximálně 25 – 35). Maximální podporovaný výkon střídače je 40 kW. [43]

## 6.2.4 Fusion Solar App

Fusion Solar je cloudová monitorovací platforma. Obdobně jako u jiných výrobců slouží pro monitoring a ovládání fotovoltaické elektrárny. Do aplikace jsou možné dva přístupy jako vlastník („Uživatel“) nebo jako instalační technik („Správce“). Technik musí založit účet a stáhnout si aplikaci, která je potřebná k propojení střídače s cloudem. Po instalaci technik umožní přístup vlastníkovvi elektrárny. Funkce aplikace pro techniky je tedy zapojení pomocí průvodce, uvedení do provozu, sledování provozního stavu elektrárny, zobrazování chyb, provádění mobilní „O&M“ (Operation and Maintenance). Funkce pro uživatele jsou sledování statusu elektrárny, množství vyrobené energie a peněžního výnosu zařízení.

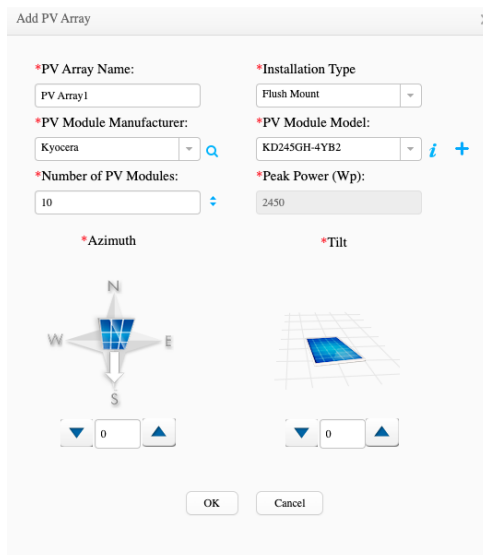


Obrázek 16: Fusion Solar monitorovací aplikace dostupné z: [45]

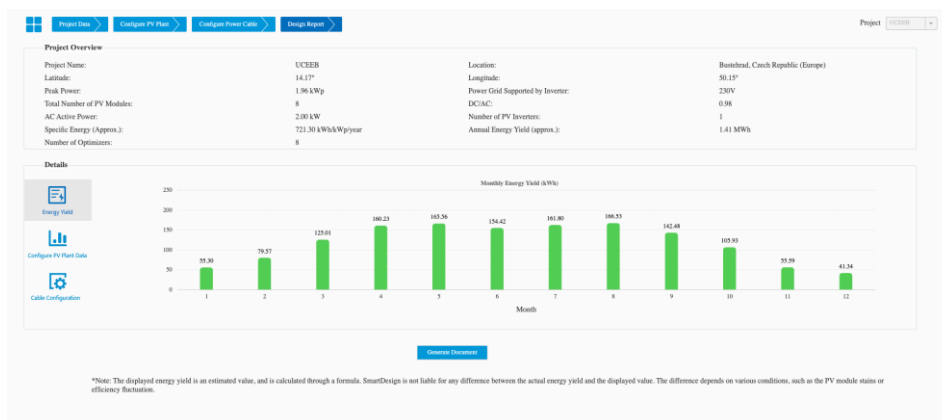
## 6.2.5 Huawei Smart Design

Huawei má obdobně jako SolarEdge svoji web-based platformu pro navrhování fotovoltaických elektráren. Oproti SolarEdge, ale uživatel nemusí pro registraci zadávat IČO, ale pouze jméno firmy, kterou však neověřuje, takže je designer přístupný i fyzickým osobám. Problém spočívá v jeho dohledatelnosti, na stránce <https://solar.huawei.com/> není na „Smart Designer“ přímý odkaz. Další problém je při hledání softwaru pomocí Google, kdy vyhledávač najde verzi 1.0, která je vidět na obrázku 17 a 18 a nikoliv 2.0, která vyšla v červenci 2022. Verze 2.0 je velice podobná „SolarEdge designeru“ a je vidět na obrázku 19 a 20. Průchod návrhem je totožný, jen některé kroky jsou prohozené. Za povšimnutí stojí lehce horší kvalita ortofoto mapy, než je tomu u konkurence a menší rozsah databáze modulů. [46],

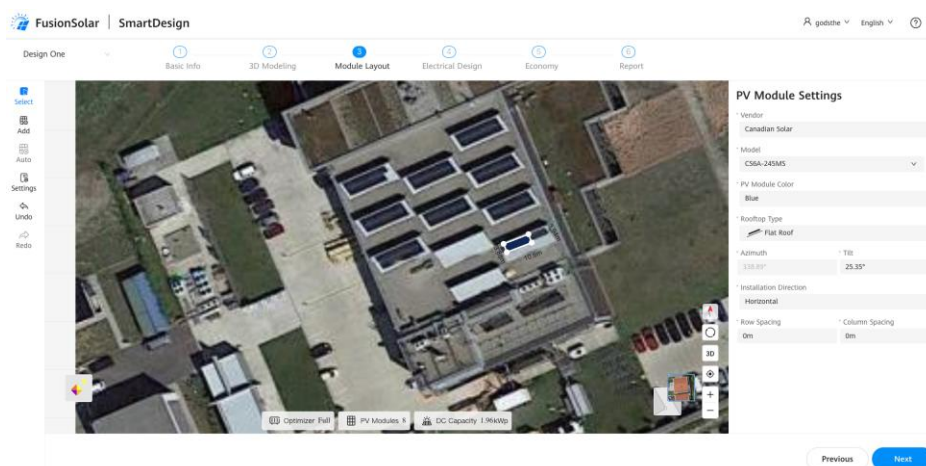




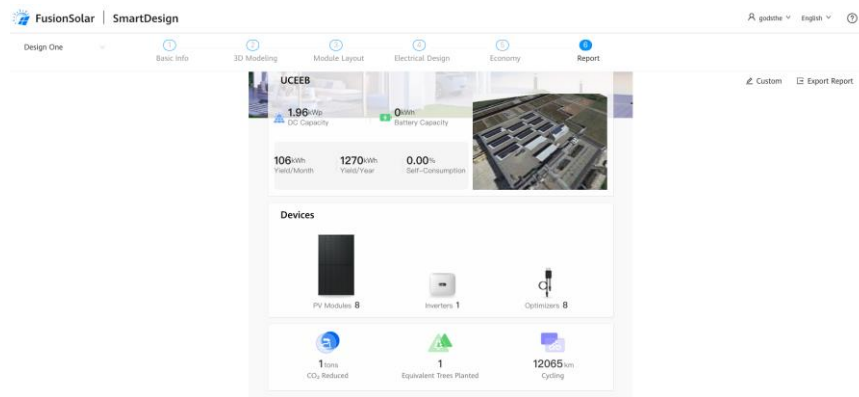
Obrázek 17: Smart Design verze 1: Naklonění modulů, dostupné z [46]



Obrázek 18: Smart Design verze 1.0: Výsledný návrh, dostupné z [46]



Obrázek 19: Smart Designer verze 2.0: Rozložení panelů, dostupné z [56]



Obrázek 20: Smart Designer verze 2.0: Výsledný návrh, dostupné z: [56]

## 6.3 Tigo

Tigo (TI) je americká firma založená v Silicon Valley (Kalifornie, USA) v roce 2007. Specializuje se na výrobu MLPE pro fotovoltaiku, ale v nabídce má také střídače (výkon 3–15 kW) a akumulátory (až 12 kWh) určené pro rezidenční použití. MLPE od Tigo se dělí dle funkce (optimalizace, monitoring a Rapid Shutdown). Jak je vidět na obrázku, tak dle funkce je nutné zajistit různé komunikační rozhraní (CCA + TAP nebo RSS Transmitter). Komunikační rozhraní CCA + TAP je vysvětleno dále.

Nabídka MLPE od Tigo				
				
<b>Funkce</b>	<b>Funkce</b>	<b>Funkce</b>	<b>Funkce</b>	<b>Funkce</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Optimalizace</li> <li>✓ Monitoring</li> <li>✓ Rapid Shutdown</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Monitoring</li> <li>✓ Rapid Shutdown</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Monitoring</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Rapid Shutdown</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Rapid Shutdown</li> </ul>
<b>Požadované příslušenství</b> CCA + TAP	<b>Požadované příslušenství</b> CCA + TAP	<b>Požadované příslušenství</b> CCA + TAP	<b>Požadované příslušenství</b> RSS Transmitter	<b>Požadované příslušenství</b> RSS Transmitter
Zvyšší produkci na částečně zastíněných nebo rozdílných modulech o výkonu do 700 W	Umožňuje monitoring a rapid shutdown pro moduly do výkonu 700 W	Umožňuje monitoring na úrovni jednotlivých modulů	Umožňuje rapid shutdown pro panel do 700 W	Umožňuje rapid shutdown 2 solárními panelům

Obrázek 21: Porovnání funkcí MLPE od Tigo, dostupné z: [49]

Optimizéry Tigo jsou jediné z vybraných výrobců, které mají v současné době otevřený ekosystém, což znamená, že pracují i se střídači jiných značek. To umožňuje vyšší variabilitu zapojení, než je tomu u konkurence. Tigo udává, že pracuje s většinou střídačů, které se v současné době na trhu vyskytují, jak je vidět na obrázku. Celý seznam modelů od různých výrobců lze najít na stránce: <https://www.tigoenergy.com/inverter-compatibility>. V případě, že konkrétní model střídače není v seznamu, lze si individuálně zažádat o jeho otestování. Stejně jako u Huawei mají optimizéry pouze Buck měnič, a tudíž mohou napětí pouze snižovat.



Obrázek 22: Seznam značek, s kterými MLPE Tigo spolupracují, dostupné z: [49]

Obdobně jako SolarEdge a Huawei má Tigo svoji výukovou platformu tzv. „Tigo Academy“. Přístup do ní je stejně jako u Huawei i pro fyzické osoby. Má také svůj YouTube kanál „Tigo“, kde jsou k nalezení instruktážní videa. Hlavní distributoři pro Českou republiku jsou Solarity s.r.o., ifTech s.r.o. Baywa r.e., Solar System s.r.o. [49]

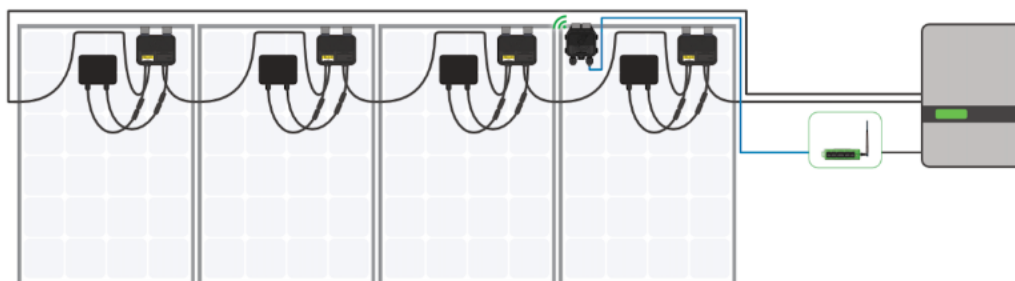
### 6.3.1 TS4-A-O

Model TS4-A-O je jediný druh MLPE výrobce, který má krom funkce Monitoring, Rapid Shutdown i funkci optimalizace. Maximální vstupní napětí, proud a výkon je 80 V, 15 A a 700 W. Rozsah MPPT je 16-80 V. Nejvyšší možné napětí systému je 1500 V. Aby mělo zařízení všechny funkce a záruku od výrobce je potřeba zařízení připojit pomocí CCA + TAP. Cloud Connect Advanced (CCA) je data logger a komunikační hub pro monitorovací platformu „Tigo energy intelligence“. Tigo Access Point (TAP) je wireless access point, který bezdrátově sbírá data z optimizérů a následně je pomocí kabelového propojení Modbus předává do CCA. K jednomu zařízení TAP může být připojeno až 300 optimizérů, přičemž rozvržení TAP musí splňovat maximální vzdálenost od nejbližšího z optimizérů 10 m a od nejvzdálenějšího maximálně 35 m v každém směru. V případě delších stringů je možné propojení více TAP. K jednomu CCA může být připojeno až 900 optimizérů nebo 7 TAP. Zařízení odesílá data do cloudu v cyklech každých 10 minut a v rozhraní monitoringu se objeví za dalších 10 minut. Zároveň umožňuje po určitou dobu uložit data v případě, že není připojen k internetu.



Obrázek 23: Tigo TAP a CCA, dostupné z [49]

Možnosti zapojení optimizérů jsou „Plná optimalizace“, „Selektivní rozmístění“, „Částečné rozmístění“ a „Slepé rozmístění“. „Plná optimalizace“ znamená osazení všech modulů a propojení s cloudem pomocí CCA + TAP, konfigurace využívá všech funkcí optimizérů. „Selektivní rozmístění“ umožňuje osadit optimizéry pouze některé moduly, na kterých se např. očekává pravidelný stín. Zbytek modulů se osadí jednodušším MLPE TS4-A-S s funkcí monitoringu a Rapid Shutdown, vše se následně opět propojí s cloudem pomocí CCA + TAP.



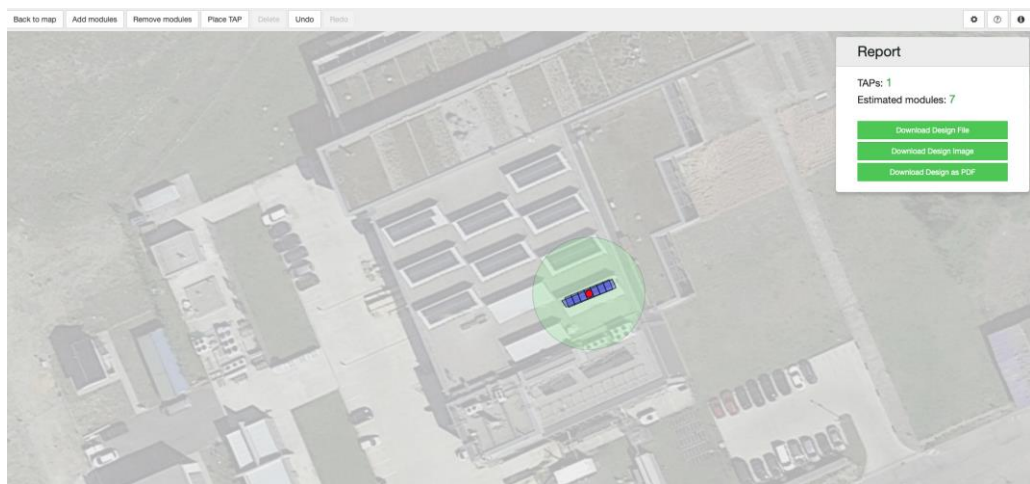
Obrázek 24: Plná optimalizace systémem Tigo, dostupné z: [16]

„Částečné rozmístění“ spočívá v rozmístění optimizérů pouze na místa, kde se očekává stín. Tato konfigurace je možná pouze, když má střídač zabudovaný MPPT a každá série modulů má jeden MPPT, více paralelních připojení na jedno MPPT není podporováno. Optimizéry jsou následně opět propojeny pomocí CCA + TAP s cloudem. V tomto rozložení jsou tedy všechny funkce optimizéru omezeny pouze na osazené panely a konfigurace je vhodná např. na pozemní instalace.

„Slepá instalace“ je použití optimizérů bez monitoringu CCA + TAP. Sestava bude mít pouze funkci optimalizace, avšak vzhledem k záručním podmínkám Tigo bude záruka snižena na 5 let, jelikož systém nemůže být dálkově diagnostikován. V případě splnění všech podmínek je záruční doba na optimizéry 25 let a CCA + TAP je 5 let. [49], [50], [51], [52]

### 6.3.2 TAP Design Tool

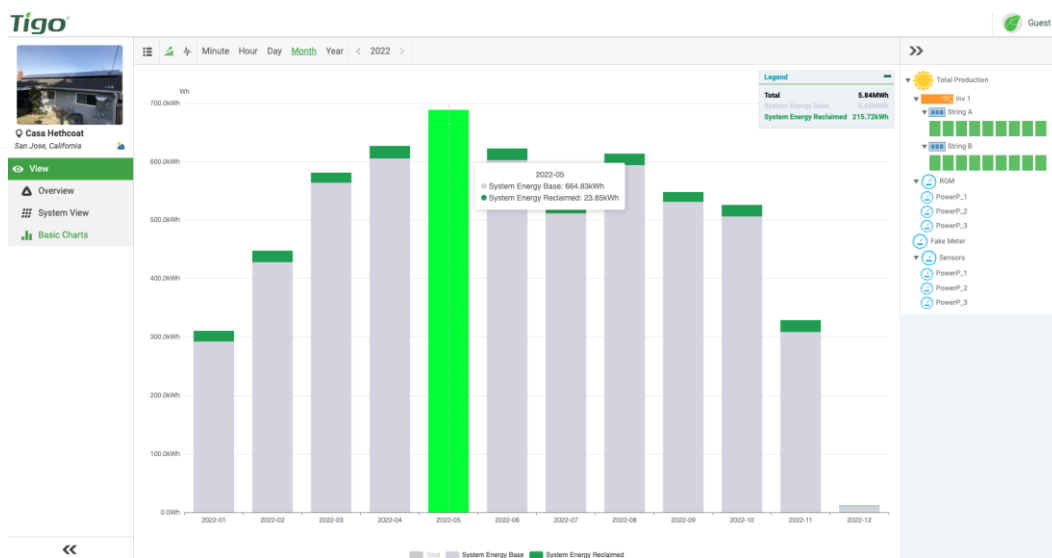
Tigo má podobně jako konkurenti svůj návrhový software „TAP Design Tool“, avšak oproti konkurenci značně zjednodušený. Je určený jako pomocník s rozložením TAP. Technik vybere na mapě prostor, kde se bude instalace nacházet a následně zaznačí do mapy rozložení panelů. Databáze modulů zde není, ale je možné změnit jejich velikost v nastavení. Následně se automaticky vygenerují vhodná místa pro umístění TAP. Výsledný report lze vidět na obrázku. [53]



Obrázek 25: TAP Design Tool, dostupné z: [53]

### 6.3.3 Tigo Energy Intelligence

Monitorovací platforma od Tigo se nazývá „Tigo Energy Intelligence“. Je dostupná na mobilních platformách iOS a Android a na webu. Stejně jako u jiných firem účet zakládá instalační technik, případně přidá novou elektrárnu do existujícího účtu. Po zprovoznění je vlastníkovi zřízen přístup. Vlastník má v základním rozhraní přístup nejen o množství produkované elektřiny na úrovni konkrétních modulů, ale i napětí a proudu. Platforma zároveň ukazuje tzv. „Reclaimed energy“ (RE), část výnosu FVE, která byla získána, díky využití optimizérů, jak je vidět na obrázku 26. Výrobce neuvádí, jak přesně výpočet funguje. [54], [55]



Obrázek 26: Graf roční výroby se složkou Reclaimed Energy, dostupné z: [55]

## 6.4 Další výrobci

Kromě vybraných výrobců, jejichž produkty se na našem území užívají existují v cizině i další výrobci optimizérů. O většině z nich je však velmi málo informací a jejich produkty jsou dostupné skrz tržiště typu [www.aliexpress.com](http://www.aliexpress.com) nebo [www.made-in-china.com](http://www.made-in-china.com).

### 6.4.1 GNE

Jiangsu GNE New energy technology se zaměřuje na optimalizaci a monitoring fotovoltaických systémů. Pro polský trh je společnost Afore Polska s.r.o. distributor, zástupce pro prodej a technická podpora.

Polský zástupce na tamní trh nabízí 3 modely, dle výkonu a to 650 W, 800 W a 850 W. Verze 650 W se následně rozděluje dle komunikace na bezdrátovou a PLC (Programmable Logic Controller) a verze 800 je určená pro připojení dvou modulů k jednomu optimizéru. Model 650 a 850 mají ochranu IP 68 a verze 650 PLC a 800 mají pouze IP 67. Maximální napětí na stringu je pro všechny optimizéry 1500 V a fungují se všemi druhy střídačů, v případě, že mají MPPT funkci (není však nikde k dohledání jejich seznam, jako u Tigo). Jedná se tedy o otevřený systém.

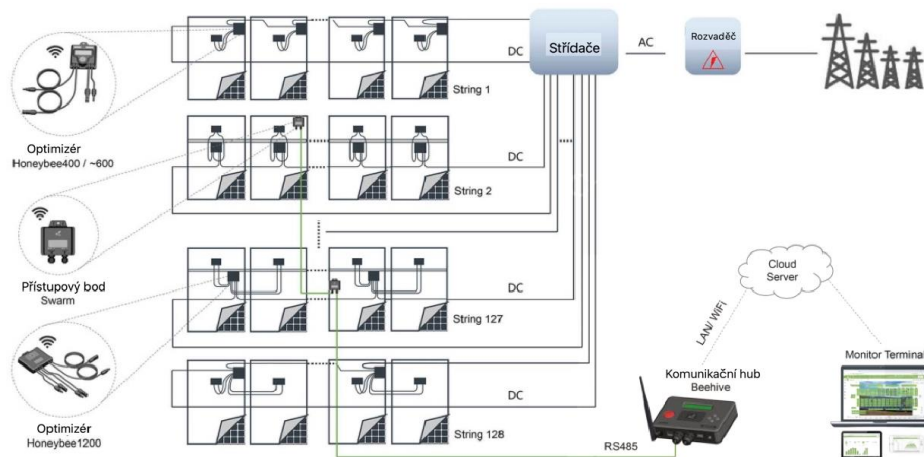
Maximální vstupní napětí, proud a výkon jsou pro 650 (75 V, 15 A, 650 W), pro 800 (2x 75 V, 13 A, 2x 450 W), pro 850 (60 V, 21 A). Komunikace probíhá bezdrátově na frekvenci 2.4 GHz nebo pomocí PLC. MPPT rozsah je u modelu 650 (12-75 V) a u modelu 850 (14-60 V). Záruční doba je na optimizéry 10 let (s možností prodloužení na 15 let s 20 % zvýšením ceny) a na komunikační zařízení je záruční doba 5 let.



Obrázek 27: Optimizér HoneyBee 650, dostupné z: [39]

Zařízení mají funkce optimalizace, Rapid Shutdown a monitoring. Aby zařízení mělo všechny funkce musí být připojeno přes komunikační rozhraní Beebox-PLC (kabelem) nebo Beehive + Swarm (bezdrátově). V případě Beebox-PLC probíhá komunikace z optimalizérů na záporném DC kabelu a následně se odesílá do sítě pomocí WiFi nebo LAN.

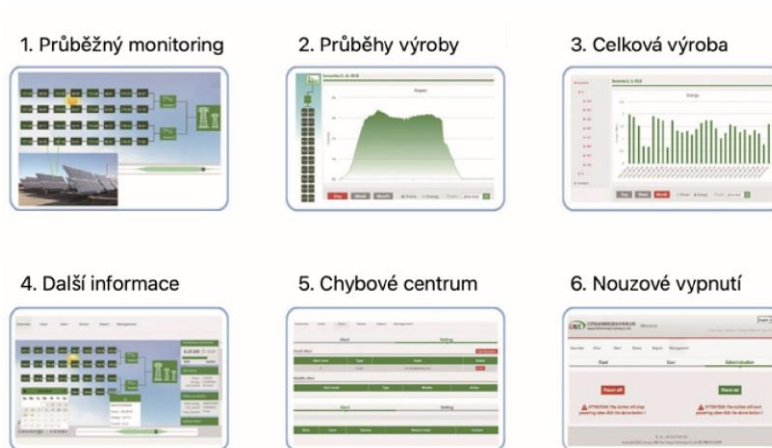
Swarm je obdoba TAP od Tiga, kdy k sobě připojí až 200 optimalizérů do vzdálenosti 50 m a následně předává data pomocí RS485 do Beehive, které data odesílá na cloud. Beehive může mít k sobě připojených maximálně 5 zařízení Swarm a celkem tedy až 1000 optimalizérů. Časový krok odesílání dat z optimalizérů je 5 minut. Příklad fungování je na obrázku 28.



Obrázek 28: Příklad využití Beehive + Swarm dostupné z: [38]

Monitorovací platforma od GNE je dostupná ze stránky: <https://afore.gnetek.com/#/login>. Platforma má možnost DEMO verze, do které je přístup bez přihlášení. Rozhraní je sice vzhledově zastaralé, avšak základní informace (výkon, výroba energie) jsou zde obsažené. Všechny funkce jsou vidět na obrázku 29. [23], [35], [37]





Obrázek 29: Monitorovací platforma GNE dostupné z: [36]

## 6.4.2 AMG Power Solutions

AMG Power Solutions je firma specializující se na výrobu turbín pro větrné elektrárny, částí fotovoltaických systémů (střídače, optimizéry atd.) a různé druhy komponentů a náhradních dílů pro elektrotechnický průmysl. Prodejce nabízí dvě verze optimizéru o výkonech 460 W a 600 W, maximální napětí na stringu je pro oba 1500 V, maximální vstupní napětí a proud je pro 460 W 9–55 V a 13 A. Pro 600 W je to 3–70 V a 15 A. Ochrana proti prachu a vodě je IP 67.

Dle výrobce optimizér funguje s jakýmkoliv střídačem na trhu, jejich seznam však není k dohledání. Pracuje s většinou poly/mono krystalických modulů, nikoliv však s flexibilními BIPV (building integrated photovoltaics) moduly. Funkce optimizéru jsou optimalizace, možnost dlouhých stringů a anti-hotspot. Funkce anti-hotspot má udržovat rozdíl teplot na modulech méně jak 10 °C. [24], [25]



Obrázek 30: AMG optimizéry dostupné z: [24]

### 6.4.3 SOLARPOINT

SOLARPOINT je značka fotovoltaických řešení v oblasti inteligentní energetiky společnosti SEDU Energy. Společnost se v současné době zabývá výrobou součástí modulů (bypass diody), optimizérů a vývojem monitorovací platformy.

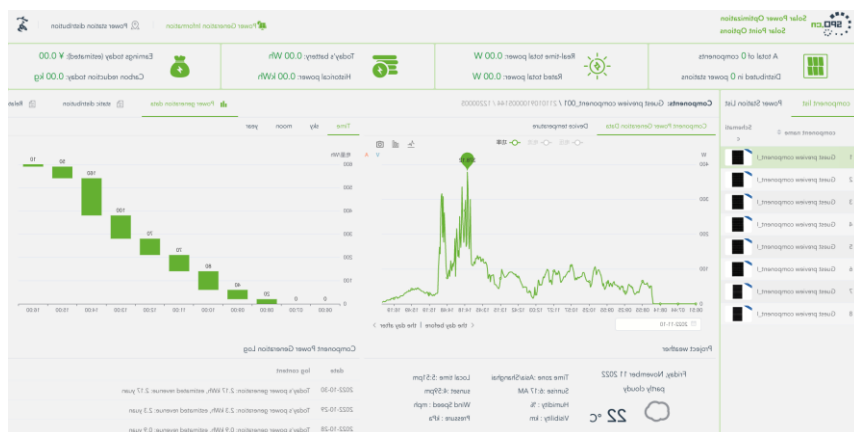
Optimizéry mají jednu výkonnostní variantu 700 W. Maximální napětí na stringu je 1500 V. Maximální vstupní proud a napětí je 20 A a 60 V. Rozsah MPPT je 8–60 V. Ochrana proti vodě a prachu je IP 68. Výrobce na svých stránkách ani v datasheetu neuvádí, pro které moduly a střídače je výrobek určen.

Hlavní funkce jsou optimalizace, Rapid Shutdown a monitoring. Monitoring je zajištěn pomocí gateway, která je zapojena v sérii s optimizéry a kromě optimalizace a sběru dat z připojeného modulu i zprostředkovává komunikaci s monitorovacím serverem pro všechny propojené optimizéry až do vzdálenosti 80 m.

Komunikace se serverem probíhá skrz WiFi nebo 4G (gateway má slot na SIM kartu). Monitorovací platforma je vidět na obrázku 32. Pro zkušební náhled není nutné se do platformy přihlásit, ale lze ji prozkoumat přes tzv. guest login. [26], [30], [32]



Obrázek 31: Solar Point optimizér (vlevo) a gateway (vpravo) dostupné z: [30]



Obrázek 32: SPO monitorovací platforma, dostupné z: [32]

## 6.4.4 SWT Power

Xiamen Sweet Power Tech Co. je výrobce zabývající se součástmi fotovoltaických elektráren (střídače, baterie, optimalizéry, konstrukce atd.). Na svých stránkách prodejce nabízí dvě varianty optimalizéru 350–450 W a 700–800 W. Stránky výrobce jsou však velmi špatně zpracované a jsou v nich faktické chyby, např. optimalizér 700–800 W má v popisu výstupní výkon 0-450 W. Jiné zdroje ukazují, že výrobce nabízí dva druhy SWT Power 350 a 400, přičemž maximální vstupní napětí a proud pro 350 je 60 V a 10 A. Pro 400 to je 75 V a 13 A. Verze 350 má IP 65 a verze 400 má IP 67.

Funkce jsou optimalizace, monitoring modulu a vzdálené vypnutí. Optimizér je vhodný pro střídače jiných značek, avšak jejich seznam nebo seznam podporovaných modulů není k dispozici. Data z monitoringu se zasílají bezdrátově nebo PLC, není však jasné, či se zpracovávají přes gate, či je potřeba pro všechny funkce střídač od stejného výrobce. [31], [33], [34]



Obrázek 33: SWT optimalizér dostupné z:[31]

## 6.4.5 SunGo

SunGo je firma vyrábějící komponenty pro fotovoltaické elektrárny (moduly, střídače, baterie a optimizéry). Výrobce nabízí jednu výkonovou verzi optimizéru 600 W ve dvou modelech. Modely se liší dle funkcí. SUNGO-OPT má pouze funkci optimalizace a SUNGO-SOPT má kromě optimalizace také funkci Rapid Shutdown. SUNGO-OPT se ještě dělí dle počtu připojených modulů, kdy může být připojen ke dvou nebo k jednomu. SUNGO-SOPT je pouze pro jeden modul.

Pro SUNGO-OPT je maximální vstupní napětí a proud 60 V a 16 A. Ochrana proti prachu a vodě je IP 67. Dle výrobce jsou moduly kompatibilní se všemi typy modulů včetně bifacialních a tenkovrstvých. Fungují s většinou značek střídačů. Výpis podporovaných střídačů nebyl k dohledání. [28], [29]



Obrázek 34: Optimizér SUNGO-OPT dostupné z: [29]

## 6.5 Porovnání výrobců optimizérů

Následující porovnání výrobců se zakládá na teoretické rešerši a je čistě subjektivní. Výrobci byli vybráni vzhledem jejich působení na českém trhu. Každý bod je hodnocený na škále 1 až 5, přičemž 1 je nejhorší a 5 nejlepší. V poznámce je následně krátké zdůvodnění hodnocení. Další informace je možné dohledat v předchozích kapitolách.

Tabulka 3: Porovnání výrobců optimizérů SolarEdge, Huawei, Tigo

	<b>SolarEdge</b>	<b>Huawei</b>	<b>Tigo</b>
<b>Jednoduchost přístupu k informacím</b>	4	3	5
Poznámka	Výuková platforma je velmi pěkně zpracovaná, avšak přístup do ní je možné po registraci firmy. Pro fyzické osoby není přístupná.	Kvalita portálu není příliš dobrá, jedná se o studijní portál pro celý konglomerát Huawei, a tedy jsou zde i informace pro jiné produkty než týkající se FVE.	Jednoduché, všechno na jednom místě.
<b>Technická podpora</b>	5	5	3
Poznámka	Online web Email Telefon (CZ)	Online web Email - Photomate (CZ) Telefon -Photomate (CZ)	Online web Telefon Podpora v CZ pouze přes distributory
<b>Dostupnost (přímý prodej)</b>	4	4	4
Poznámka	Výrobce využívá distributory. Přímý prodej jen výjimečně pro velkoodběratele.	Výrobce využívá distributory. Přímý prodej jen výjimečně pro velkoodběratele.	Výrobce využívá distributory. Přímý prodej jen výjimečně pro velkoodběratele.
<b>Variabilita použití</b>	4	3	4
Poznámka	Není možná částečná optimalizace. Omezení pro malé elektrárny z důvodu minimálně 6 optimizérů na string.	Umožňuje plnou i částečnou optimalizaci. Omezení pro velké elektrárny(nejvýkonnější střídač je 40 kW)	Umožňuje plnou, částečnou i selektivní optimalizaci. Podpora pouze pár typů střídačů nad 60 kW.

<b>Řešení požární bezpečnosti</b>	4	4	5
Poznámka	Snižuje napětí na úrovni modulu na 1 V, tedy až 50 V na string.	Snižuje napětí na úrovni modulu na 0 V, ale pouze v případě plné optimalizace.	Snižuje napětí na úrovni modulu na 0 V, v případě plné či selektivní optimalizace.
<b>Jednoduchost instalace</b>	5	5	3
Poznámka	Komunikace OPM se střídačem po DC kabelu, snižuje počet pohybů při zapojení i obtížnost projektování.	Komunikace OPM se střídačem po DC kabelu, snižuje počet pohybů při zapojení i obtížnost projektování.	Krom zapojení OPM je nutné propojit i komunikaci, což přidává další pohyby. Omezení při rozmístění TAP, kvůli stínění od objektů.
<b>Návrhový software</b>	5	4	2
Poznámka	Jednoduchý, intuitivní, pouze nutnost založení uživatelského účtu na IČO.	Verze 2.0 je obtížnější k dohledání a zatím má omezenou databázi modulů. Ortofotografie má horší kvalitu.	Velice jednoduchý a omezený software pro návrh rozmístěný TAP. Nemá další využití.
<b>Monitorovací platforma</b>	4	5	4
Poznámka	Zastaralý vizuál, v základním nastavení málo informací pro vlastníka FVE (nejsou informace na úrovni modulů)	Moderní vizuál, dostatečný objem informací pro vlastníka.	Současný vizuál, vlastník má rozsáhlé informace na úrovni modulu. Funkce RE není jasná.
<b>Záruka</b>	5	5	5
Poznámka	Záruční doba je 25 let.	Záruční doba je 25 let.	Záruční doba je 25 let.
<b>Výsledný součet</b>	40	36	35

## 7 Návrh experimentu

Cílem experimentu je zjistit a porovnat dynamické vlastnosti optimizérů od značek Huawei (SUN 2000-450W-P), Tigo (TS4-A-O) a SolarEdge (P505). Všechny experimenty byly navrženy, aby odpovídali možnostem daných optimizérů, ale zároveň možnostem laboratoře Univerzitního centra energeticky efektivních budov v Buštěhradu.

Možnosti měření byly celkem tři. Za prvé využít venkovních fotovoltaických panelů na střeše budovy, za druhé použít solární simulátor TerraSAS v laboratoři fotovoltaiky a za třetí použít statický umělý zdroj světla, neboli velký solární simulátor. Návrhy byly postupně upravovány, jak experiment postupoval.

### 7.1 Měření pomocí venkovních panelů

První návrh byl využít 8 stávajících fotovoltaických modulů Kd-245gh-4yb o výkonu 245 W umístěných na světlíku na střeše objektu a 8 nových AEG AS-M3407U-S(M6)-400/HV o výkonu 400 W, které měli být umístěny na dalším světlíku ve stejné orientaci. Každá sada by se osadila optimizéry od jedné značky a následně by se mezi sebou porovnávali, aby bylo dosaženo stejných okolních podmínek.



Obrázek 35: Solární moduly (245 W) na světlíku UCEEB

Problém tohoto návrhu však bylo načasování experimentu. V první řadě by se nestihla nainstalovat druhá sada panelů a v druhé řadě byl termín experimentu naplánován na měsíc prosinec, kdy je u nás statisticky nejnižší osvit v roce. Z těchto důvodů se od návrhu upustilo.

## 7.2 Měření pomocí simulátoru TerraSAS 1000V/10 A

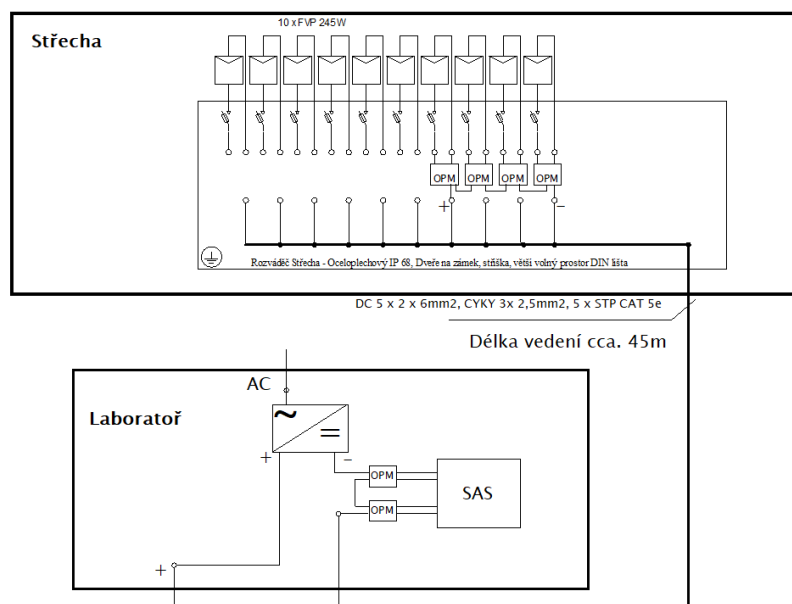
Hlavní součástí fotovoltaické laboratoře na UCEEB je solární simulátor, což je vlastně DC zdroj, který umožňuje na výstupu nastavit libovolnou velikost napětí a proudu v rozmezí až 1000 V a 10 A, a tím simuluje výkon solárních panelů. Problém se simulátorem je, že má pouze dva výstupy (CH1 a CH2) a je k němu možné připojit maximálně dva optimizéry. U výrobce Tigo, by to nebyl problém, jelikož jeho optimizéry fungují nezávisle na počtu optimizéru ve stringu. Na druhou stranu u značky SolarEdge je nutný minimální počet k zapnutí střídače. Pro zvolenou kombinace střídače SolarEdge SE2200H a optimizéru P505 je to 6. Huawei umožňuje částečnou optimalizaci, jako Tigo, ale pro plnou optimalizaci potřebuje ke spuštění střídače Huawei SUN 2000-3KTL 4 optimizéry SUN 2000-450W.



Obrázek 36: Solární Simulátor SAS

První pokusy probíhali na střídači značky Huawei, a tedy bylo rozhodnuto využít 4 střešních modulů Kd-245gh-4yb, které jsou rozpojené v rozvodné skříni na střeše a následně svedené do laboratoře FVE. 4 optimizéry byly umístěny do střešního rozvaděče a 2 byly umístěny vedle střídače v laboratoři. Schéma zapojení je vidět na obrázku 37. Vyzkoušeno bylo celkem 5 možností zapojení na solární simulátor, avšak žádný neměl kýžený výsledek. Optimizéry připojené k simulátoru nedokázali ani v jednom případě najet do maximálního bodu výkonu. Po zapojení oscilovali kolem nuly nebo nastala jiná chyba.





Obrázek 37: Schéma zapojení optimizérů střecha + laboratoř

Při zapojení č.1 došlo k problému, že nízký osvit na venkovních optimizérech omezoval proud na stringu a tedy i optimizéry připojené na simulátor. Zapojení č. 2 mělo stejný výsledek i v případě zapojení pouze jednoho optimizéru na simulátor. Při zapojení č.3 byl simulátor zapojen do série s venkovními optimizéry a fungoval defacto jako další modul bez optimizérů. Toto zapojení mělo menší úspěch, kdy druhý optimizér připojený na simulátor začal pracovat, avšak po chvíli střídač nahlásil chybu Over voltage. U zapojení č.4 byl tedy výkon simulátor na stringu snížen, což způsobilo chybu simulátoru Detekce dvou zdrojů v sérii.

Tabulka 4: Výsledky zapojení na solární simulátor - Huawei

Zapojení č.	CH 1	CH 2	Střešní FVE	Výsledek
1	OPM	OPM	4x OPM	Nefunguje (nízký osvit na venkovních OPM omezuje OPM připojené na simulátor)
2	OPM	Nepoužit	4x OPM	Nefunguje (nízký osvit na venkovních OPM omezuje OPM připojené na simulátor)
3	OPM	Připojen do série bez optimizéru	4x OPM	Fungovalo pro vyšší napětí, ale na vstupu měniče byl problém s Over Voltage
4	Nepoužit	Připojen do série bez optimizéru	4x OPM	Fungovalo, ale na simulátoru byla chyba: Více zdrojů v sérii
5	Nepoužit	Nepoužit	4x OPM	Fungovalo, ale výroba byla vzhledem k nízkému osvitu minimální

Následně proběhlo ještě zkušební měření s dvěma optimizéry Tigo připojených na simulátor v kombinaci se střídačem Huawei. Obě zapojení však nefungovala. V č.6 byl malý spouštěcí zdroj napětí na střídači a ten se vůbec nezapnul (spouštěcí napětí střídače je 100 V) a na každém optimizéru bylo nastaveno 50 V a po zvýšení napětí na optimizérech (70 V) se zapnula Ochrana přepětí na simulátoru, aby se optimizéry nepřetížili (Tigo má max. vstupní napětí 80 V).

Tabulka 5: Výsledky zapojení na solární simulátor - Tigo

Zapojení č.	CH 1	CH 2	Střešní FVE	Výsledek
6	OPM	OPM	Nepoužito	Nefunguje (malý spouštěcí zdroj napětí)
7	OPM	OPM	Nepoužito	Nefunguje (Over voltage protection)

### 7.3 Měření na velkém solárním simulátoru

Solární simulátor PSE AG s umělým slunečním zářením je statický zdroj světla skládající se z 8 Metal-halogenidových lamp o výkonu 4000 W (ATLAS MTT GmbH „Solar Constant 4000“) pohyblivých ve dvou osách umístěných v konstrukci pohybující se nahoru a dolů. Kolmo na svítidla se nachází testovací prostor, na který se uchytí zkoumaný fotovoltaický modul nebo kolektor. Celou tuto konstrukci lze naklánět, čímž je dosaženo simulace umístění např. na šikmé střeše. Přístroj dokáže vyvinout ozáření až 1000 W/m<sup>2</sup> na ploše 2,24 x 3,91 m s homogenitou +- 15 %.

Před samotným umístěním modulů do testovacího prostoru proběhlo na celé ploše měření homogenity. To zjistilo, že v různých místech je homogenita až +-30 %. Následně proběhla korekce rozmístění lamp a opětovný test. Po kalibraci, o co možná největší homogenitu na celé ploše, byl průměrný osvit 784 W/m<sup>2</sup>, přičemž nejnižší naměřená hodnota byla 582 W/m<sup>2</sup> (v rozích testovacího prostoru) a 878 W/m<sup>2</sup> (uprostřed testovacího prostoru). Barevně je homogenita zobrazená na obrázku 38. Zelená barva je nehomogenita +-5 % a červená je více či méně než +-12 %.



Obrázek 38: Homogenita ozáření před kalibrací (vlevo) a výsledná (vpravo), pyranometr (uprostřed)

Při měřeních byly použity následující pomůcky:

1x Velký solární simulátor PSE AG s lampovým polem 8x ATLAS MTT GmbH „Solar Constant 4000“

1x Pyranometr

1x Metrel MI 3108

1x Zimmer LMG670

4x Senzor Adaptor L60-X-ADSE + sonda pro bezkontaktní měření proudu

3x Kvádr polystyrenu 50x100 cm

1x AC FVE rozvaděč

1x Programovatelná elektronická zátěž ZSAC

1x Hliníkový drát o délce 250 cm a průměru 8 mm

6x Modul AEG AS-M3407U-S(M6)-400/HV 400Wp

6x Optimizér TS4-A-O

6x Optimizér SolarEdge P505

6x Optimizér Huawei SUN 2000-450W-P2

1x Střídač SolarEdge SE2200

1x Střídač Huawei SUN 2000-3KTL-L1

Dále pak kabeláž a další spojovací materiál.

### 7.3.1 Měření voltampérové charakteristiky

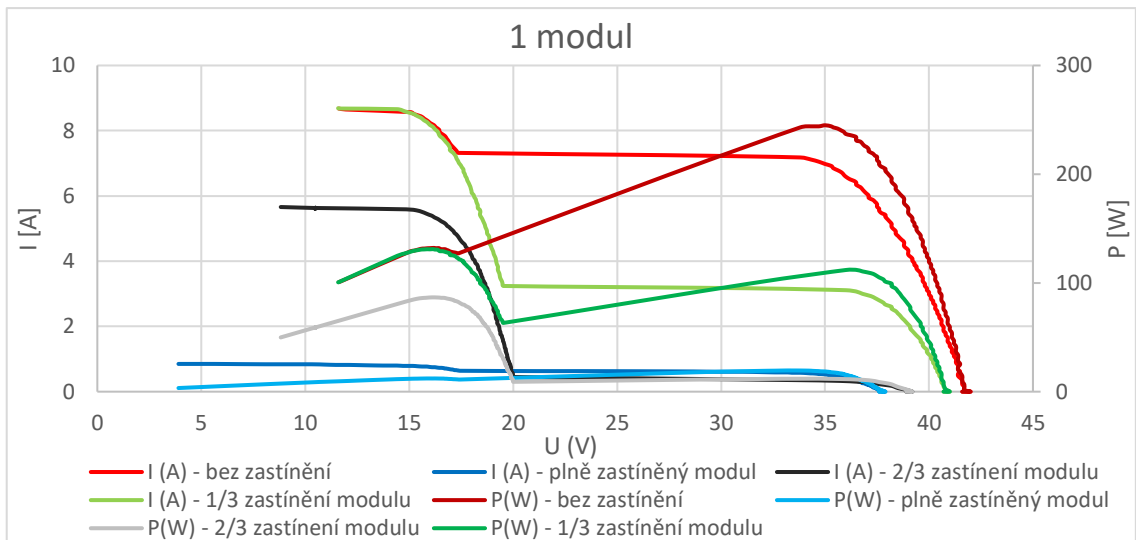
Jako součást experimentu byla proměřena voltampérová charakteristika samotného modulu, stringu o 5 stejně orientovaných modulech a stringu 6 modulů s jedním jinak orientovaným. Pro každou konfiguraci bylo provedeno 6 měření pro různé druhy zastínění. Nejdříve byl měřen modul či string nezastíněný, následně se zastínila 1/3 modulu pomocí polystyrenového kvádrů, poté dvěma kvádry 2/3 modulu a 3 kvádry celý modul. Následně se kvádry odstranili a přiložila se hliníková hromosvodová tyč rovnoběžně s delší stranou modulu, a nakonec se položila příčně. Stejný postup stínění byl použit i dále v průběhu experimentu.



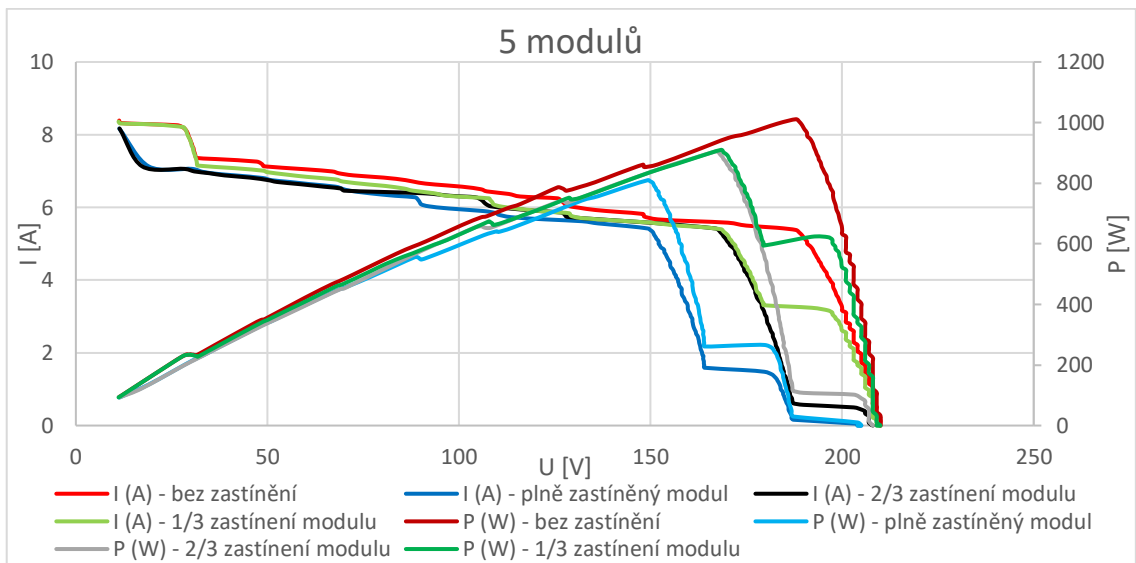
Obrázek 39: Ukázka plného zastínění polystyrenem, drát podélně, drát šikmo

Ze zařízení Metrel MI 308 byla stažena data pro vytvoření voltampérové charakteristiky (VA) a křivky výkonů na grafech 7, 8 a 9. Pro přehlednost byly v grafech vynechány křivky drátu položeného podélně a napříč, jelikož stín z drátu neměl na průběh příliš velký vliv. Obě křivky měly průběh totožný se stavem bez zastínění.

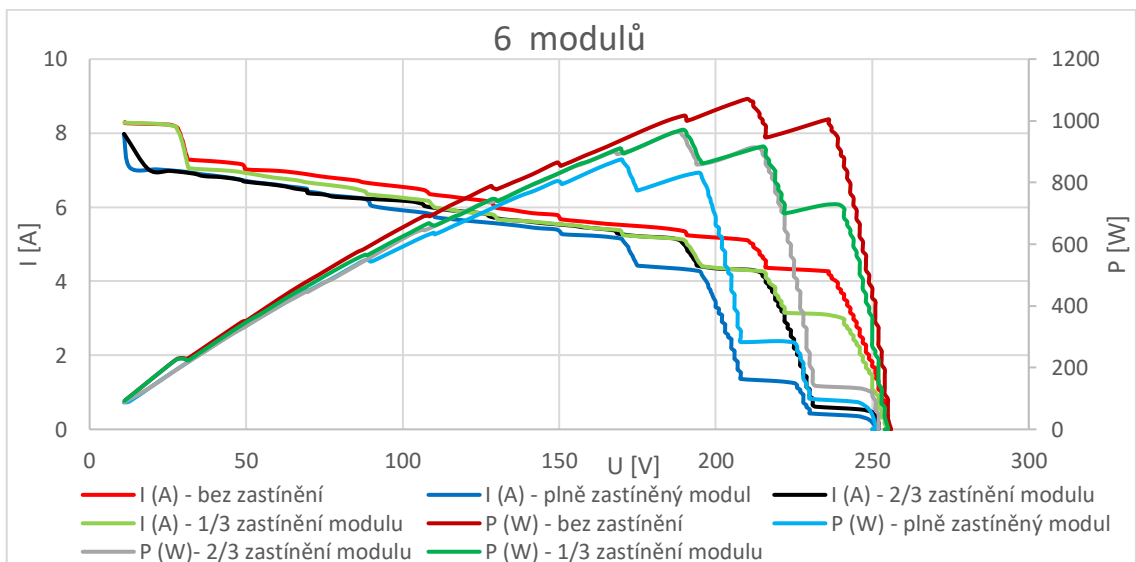
Jak je vidět na grafu 7, zastíněním 1/3 modulu se sníží celkový výkon, a tedy při zachování napětí se sníží proud. To samé se stane i při dalším stínění, než modul přestane mít výkon a proud klesne na nulu. Při zapojení více modulů do série a postupném stínění testovaného modulu jako v předchozím případě vznikají na výkonové křivce „zuby“, což jsou lokální maxima, která jsou popsána v kapitole 4.



Graf 7: Voltampérová charakteristika a výkonová charakteristika pro 1 modul



Graf 8: Voltampérová charakteristika a výkonová charakteristika pro string 5 modulů

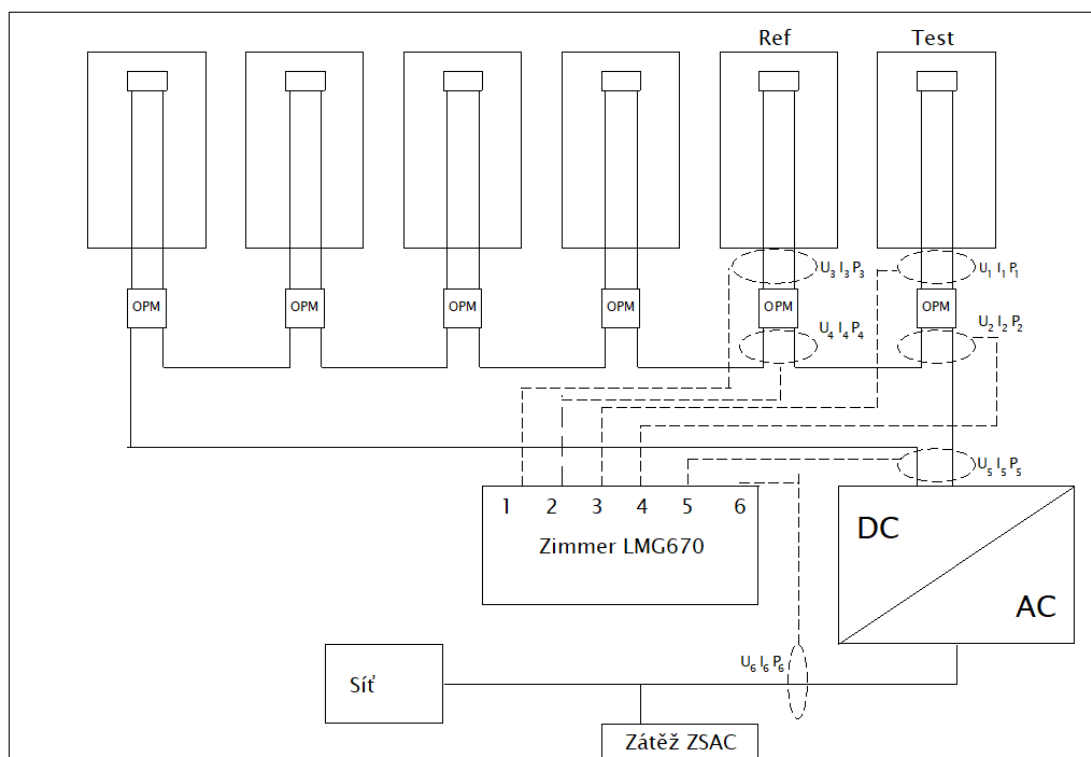


Graf 9: Voltampérová charakteristika a výkonová charakteristika pro string 6 modulů

### 7.3.2 Měření plně optimalizované soustavy

Měření plně optimalizované FVE proběhlo na 6 modulech a zkušeny byly všechny typy optimizérů. Nejprve byl otestován systém SolarEdge, následně střídač Huawei s optimizéry Huawei, a nakonec střídač Huawei s optimizéry Tigo. Tigo byly použity bez komunikačního rozhraní CCA + TAP, takže umožňovali pouze funkci optimalizace, nikoliv monitoring a Rapid Shutdown. Vzhledem k rozdílné orientaci modulů nebyl testován string pouze se střídačem Huawei bez OPM.

Pro naměření hodnot byl využit Zimmer LMG670 s 6 kanály. Na každém z nich bylo měřeno vždy napětí, proud a výkon. Odečítaná místa jsou vidět ve schématu na obrázku 40. Jedná se o vstup a výstup z testovaného (Test) optimizéru, vstup a výstup z referenčního (Ref) optimizéru a měnič na DC straně a AC straně. Modul testovaného optimizéru byl postupně zastiňován a referenční modul měl celou dobu plný osvit.



Obrázek 40: Schéma měřených míst

Proud byl měřen na optimizérech bezkontaktně a napětí bylo měřeno, jak je vidět na obrázku 41. Proud i napětí bylo na DC a AC straně měniče měřeno napřímo v experimentální rozvaděči. Výkon ze střídače byl před vyvedením do sítě snížen pomocí umělé zátěže ZSAC.

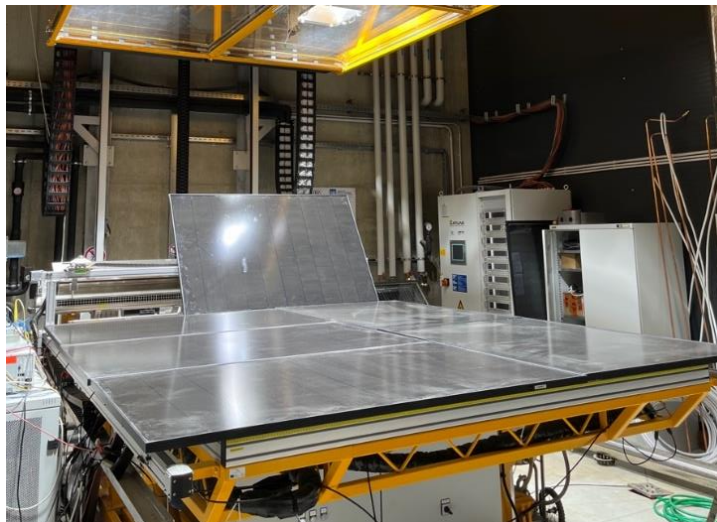


Obrázek 41: Měření proudu (vlevo) a napětí jednoho pólu (vpravo)



Obrázek 42: Experimentální rozvaděč (vlevo) a zapojení kanálů Zimmer (vpravo)

Po naběhnutí střídače do operačního bodu se spustilo nahrávání na Zimmeru s krokem 1 s a následovaly periody (300 s), kdy nejdříve byl modul bez zastínění (0-300 s) a poté se stínil z 1/3 (301 – 600 s), 2/3 (601 – 900 s), celý (901 - 1200 s) a nakonec byl na něj položen ocelový drát podélně (1201 - 1500 s) a příčně (1501-1800 s), jak je vidět na obrázku 39.



Obrázek 43: Rozložení 6 modulů v různé orientaci

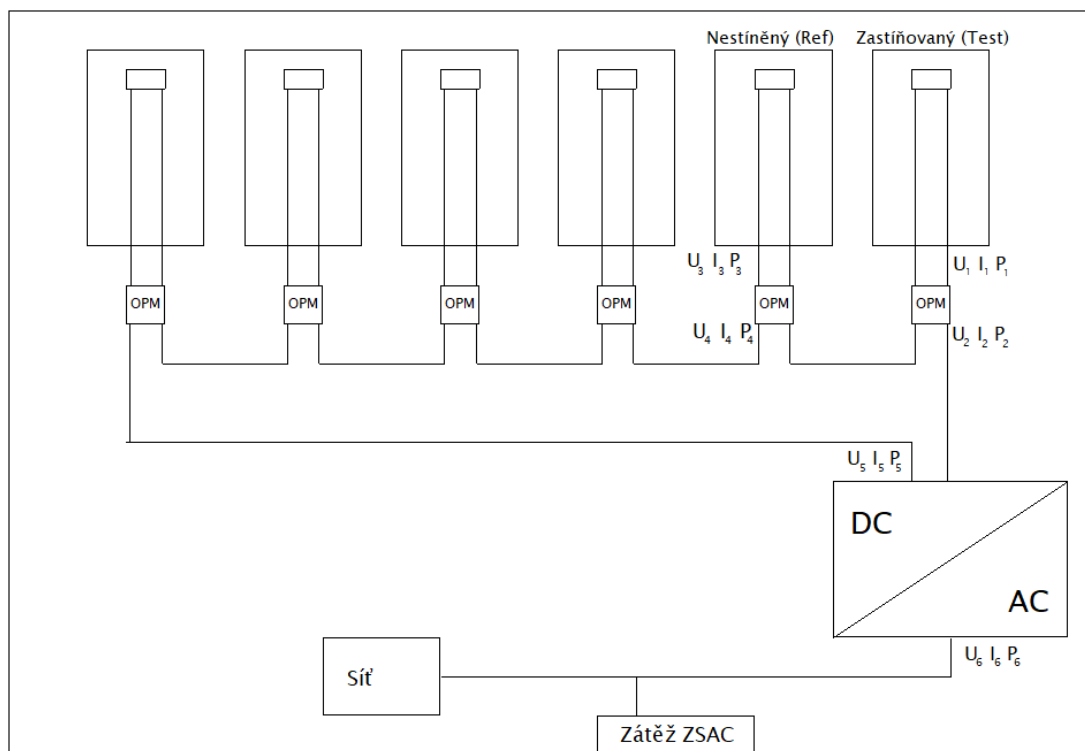
## SolarEdge

System SolarEdge byl nejprve vyzkoušen, stejně jako ostatní značky pouze na 5 modulech. Po načtení optimizéru však střídač zůstal v módu Idle a nenajel do pracovního režimu. Po přidání 6 modulu do stringu se již střídač spustil (pro použitý OPM P505 je dle výrobce minimální délka stringu 6 OPM).

Jak je vidět z grafu 10, střídač si v tomto zapojení udržuje konstantní napětí na vstupu přibližně 375 V. Aby ho udržel, snižuje při snížení výkonu zastíněním proud na stringu. Současně se však mění i napětí na optimizérech, kdy zastíněný OPM svoje výstupní napětí sníží, a naopak ostatní OPM svoje výstupní napětí lehce zvýší, jak je vidět při zastínění 1/3 modulu.

Při zastínění 2/3 a celého modulu jsou hodnoty podobné, jelikož se nejspíše sepnuly obě by-pass diody. Modul v tomto případě neměl skoro žádný výkon. Změna proběhla až při zastínění drátem, který však měl na modul jen malý vliv. Částečný důvod je, že byl různě ohnutý, takže stín z něj nebyl na panel všude stejný. Celý průběh je vidět v grafech 10, 11 a 12, nebo v tabulce 6.

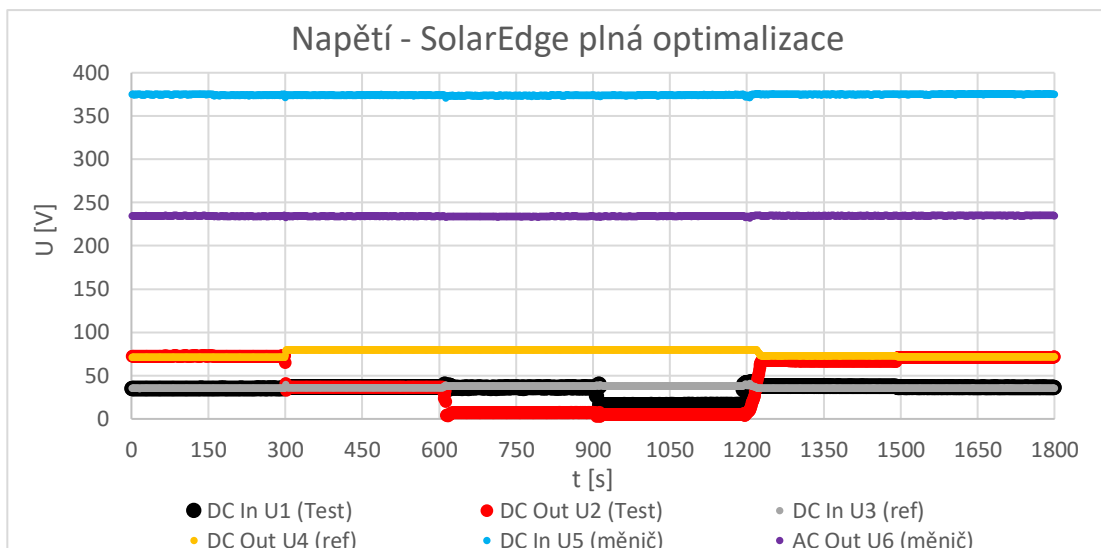




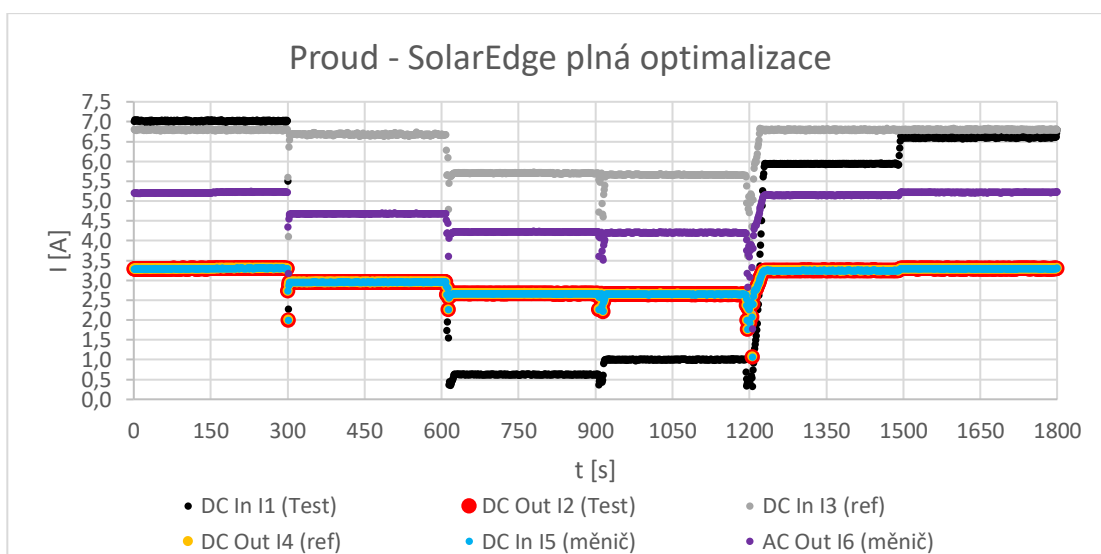
Obrázek 44: Schéma pro tabulku průběhů

Tabulka 6: Průměrné hodnoty napětí, proudu a výkonu pro každé zastínění - SolarEdge

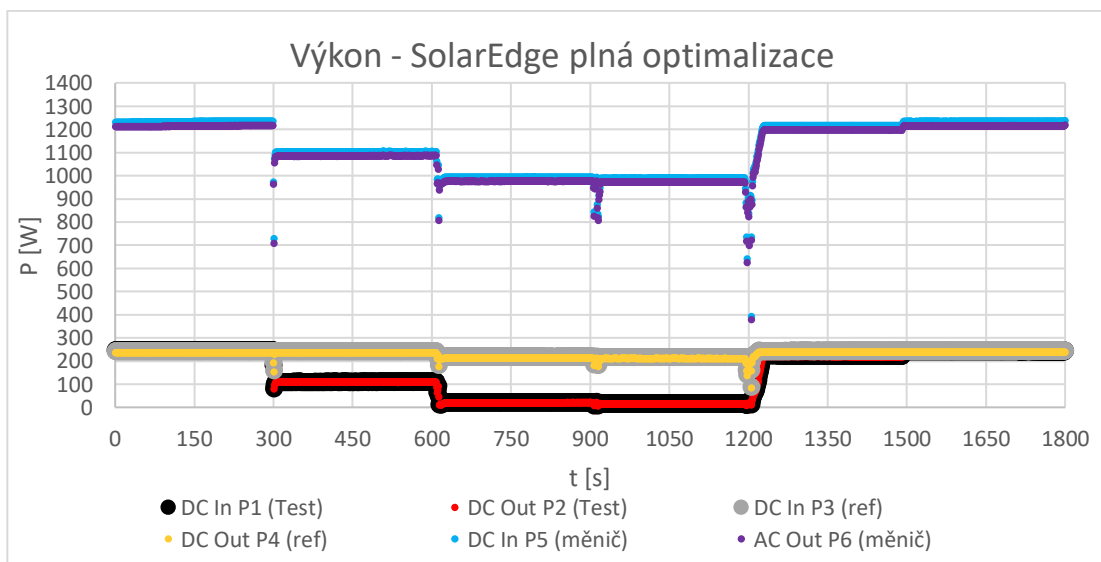
SE	Nezastíněné (0-300 s)	Stín 1/3 (301-600 s)	Stín 2/3 (601-900 s)	Stín celý (901-1200 s)	Drát podélně (1201-1500 s)	Drát příčně (1501-1800 s)
U1 [V]	35,30	37,19	36,34	16,24	38,20	36,41
U2 [V]	72,92	36,98	7,74	5,57	62,43	71,96
U3 [V]	35,65	36,38	38,39	38,49	36,15	35,93
U4 [V]	71,59	79,83	79,85	79,86	73,79	72,14
U5 [V]	374,79	374,36	373,91	374,44	375,15	375,47
U6 [V]	234,77	234,50	234,24	234,60	235,03	235,22
I1 [A]	7,01	2,96	0,62	0,99	5,46	6,71
I2 [A]	3,29	2,94	2,65	2,64	3,17	3,29
I3 [A]	6,79	6,66	5,69	5,65	6,66	6,80
I4 [A]	3,29	2,95	2,66	2,64	3,17	3,30
I5 [A]	3,29	2,94	2,65	2,64	3,17	3,29
I6 [A]	5,21	4,67	4,21	4,19	5,03	5,22
P1 [A]	247,30	109,90	22,67	16,12	207,31	244,20
P2 [A]	239,82	108,82	20,49	14,68	201,44	236,95
P3 [A]	242,03	242,29	218,35	217,32	240,15	244,26
P4 [A]	235,73	235,34	212,06	211,05	233,74	237,90
P5 [A]	1233,65	1103,65	990,43	979,91	1217,23	1234,37
P6 [A]	1213,50	1083,89	974,37	970,90	1170,40	1217,55



Graf 10: Průběh napětí SolarEdge plná optimalizace



Graf 11: Průběh proudu SolarEdge plná optimalizace



Graf 12: Průběh výkonů SolarEdge plná optimalizace

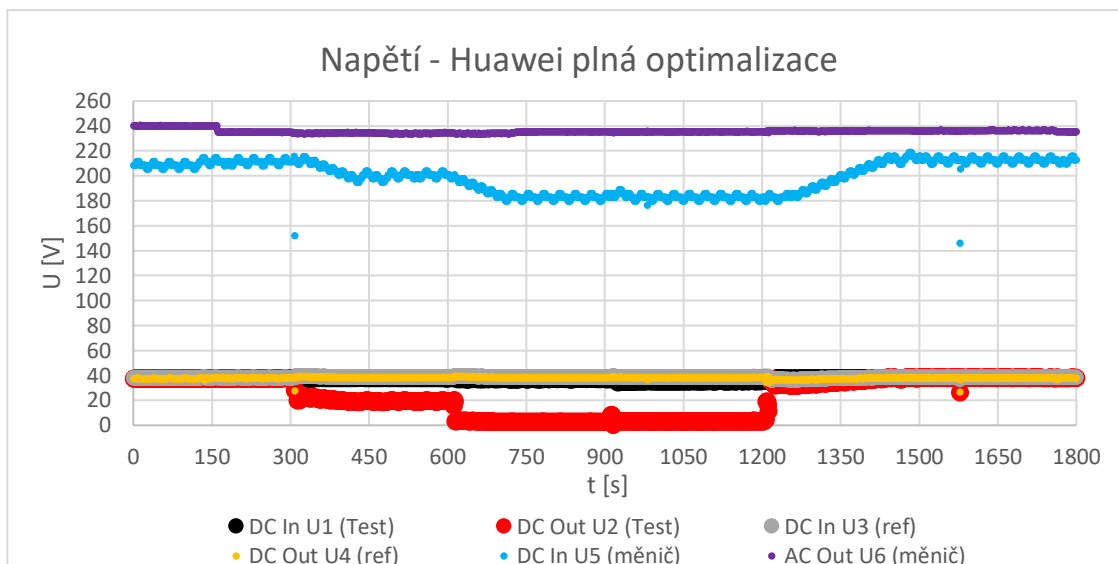
## Huawei

System Huawei byl testován jako druhý. Oproti SE zde střídač neudrží napětí, ale proud na stringu na hodnotě kolem 5,5 A. Pokud však dojde k zastínění 1/3 části modulu a jeho výkon se sníží, musí optimizér, aby udržel požadovaný proud snížit napětí na výstupu z OPM. Vzhledem k poklesu proudu na vstupu na 3,02 A, se sníží výstupní napětí na 20,84 V. Současně proud na stringu mírně klesne na 5,35 A.

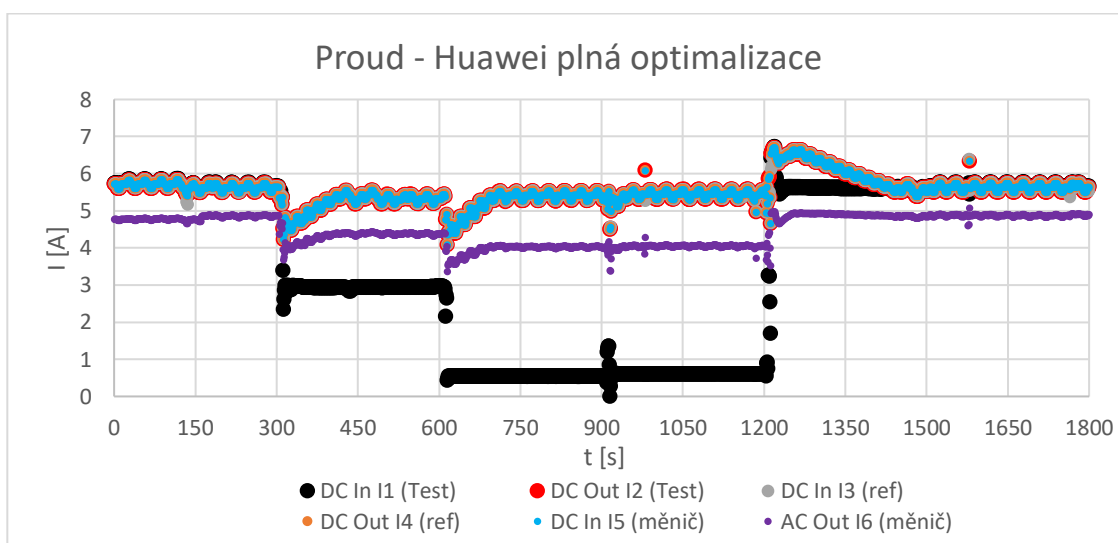
Následným zastíněním 2/3 modulu již modul neprodukuje dostatečný výkon a optimizér nemůže více snižovat napětí, tak se modul od stringu odpojí přes bypass, aby nesnižoval celkový výkon. Následným zastíněním se již nic nezmění. Po odkrytí zastínění a přiložení drátu se lehce zvýší výkon na vstupu do optimizéru, ale postupně klesne na hodnotu bez zastínění. Je možné, že panel pod zakrytím vychladl a chvíli trvalo, než se dostal na původní teplotu. Průměrné hodnoty průběhu jsou vidět v tabulce 7. Schéma pro tabulku je na obrázku 40.

Tabulka 7: Průměrné hodnoty napětí, proudu a výkonu pro každé zastínění - Huawei

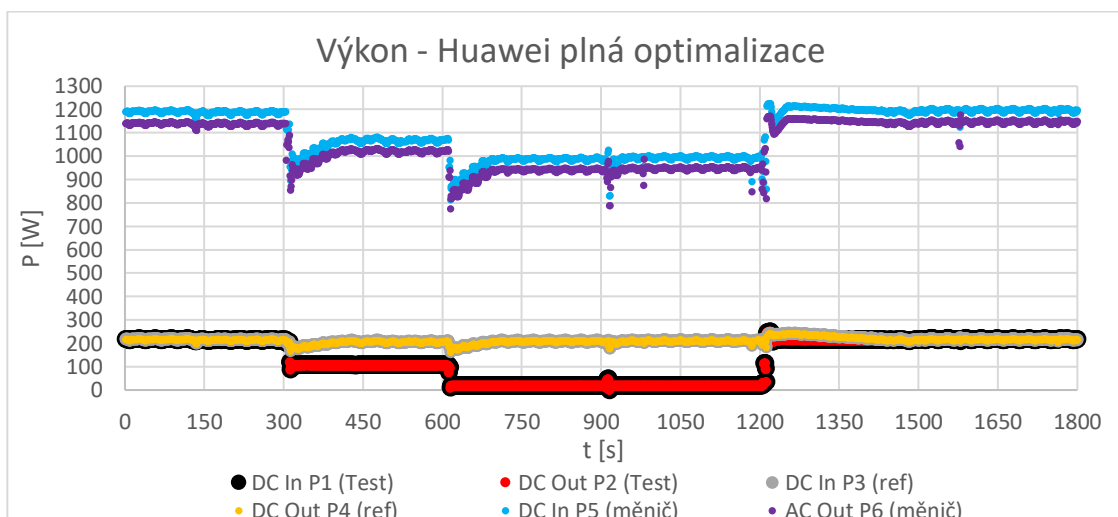
HU	Nezastíněné (0-300) s	Stín 1/3 (301- 600) s	Stín 2/3 (601- 900) s	Stín celý (901- 1200) s	Drát podélně (1201- 1500) s	Drát příčně (1501- 1800) s
U1 [V]	38,00	36,95	36,19	34,46	38,36	38,58
U2 [V]	37,73	20,84	3,96	3,34	34,41	38,27
U3 [V]	38,14	38,80	38,81	38,70	37,78	38,45
U4 [V]	37,86	38,51	38,56	38,43	37,43	38,12
U5 [V]	210,22	202,81	186,02	183,24	198,81	212,53
U6 [V]	237,90	234,39	234,94	235,48	236,24	236,34
I1 [A]	5,68	3,02	0,65	0,60	5,47	5,65
I2 [A]	5,66	5,22	5,25	5,41	6,01	5,64
I3 [A]	5,67	5,22	5,26	5,42	6,01	5,64
I4 [A]	5,66	5,23	5,26	5,42	6,01	5,65
I5 [A]	5,65	5,22	5,25	5,41	6,00	5,64
I6 [A]	4,81	4,32	3,98	4,03	4,84	4,87
P1 [W]	215,73	111,69	23,48	20,75	210,21	217,81
P2 [W]	213,46	108,46	20,67	17,96	206,52	215,40
P3 [W]	216,19	202,39	204,18	209,84	226,81	216,63
P4 [W]	214,36	200,74	202,54	208,14	224,78	214,82
P5 [W]	1187,82	1054,42	974,42	990,31	1189,22	1194,92
P6 [W]	1138,16	1007,76	928,54	943,70	1138,15	1145,22



Graf 13: Průběh napětí Huawei plná optimalizace



Graf 14: Průběh proudů Huawei plná optimalizace



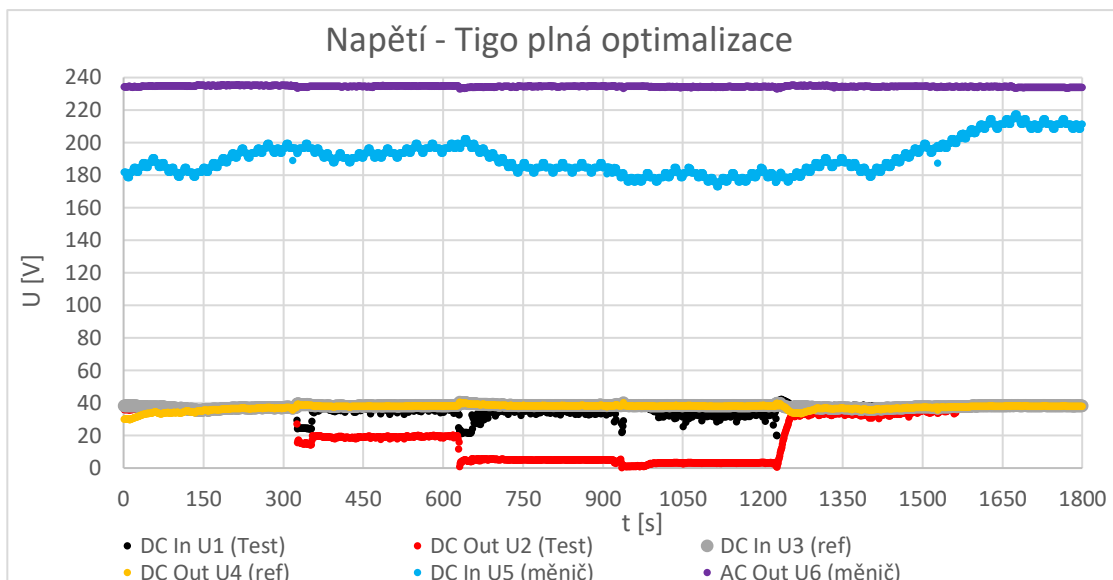
Graf 15: Průběh výkonů Huawei plná optimalizace

## Tigo

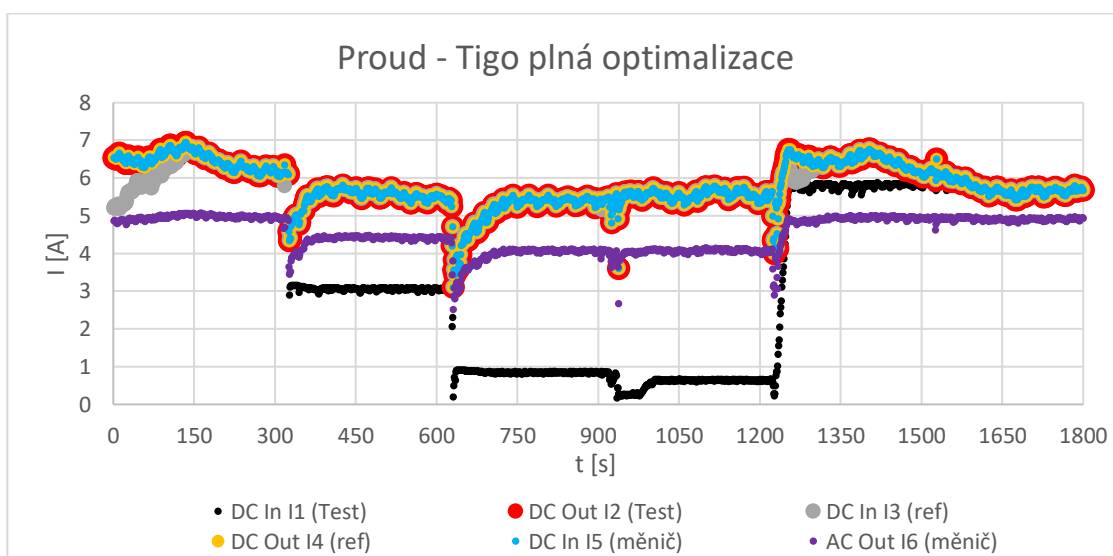
Konfigurace Huawei + Tigo byla měřena jako poslední. Optimizéry byly zapojeny bez komunikace (CCA + TAP). Jak je vidět z grafů 16, 17 a 18, průběhy jsou velice podobné jako u konkurenčního Huawei. OPM se řídí proudem na stringu a snaží se ho za každou cenu udržet. Na začátku měření byl proud na stringu vyšší (6,45 A), ale to mohlo být způsobeno startem střídače a započítáním měření před ustáleným stavem. Schéma pro tabulku je na obrázku 40.

Tabulka 8: Průměrné hodnoty napětí, proudu a výkonu pro každé zastínění - Tigo

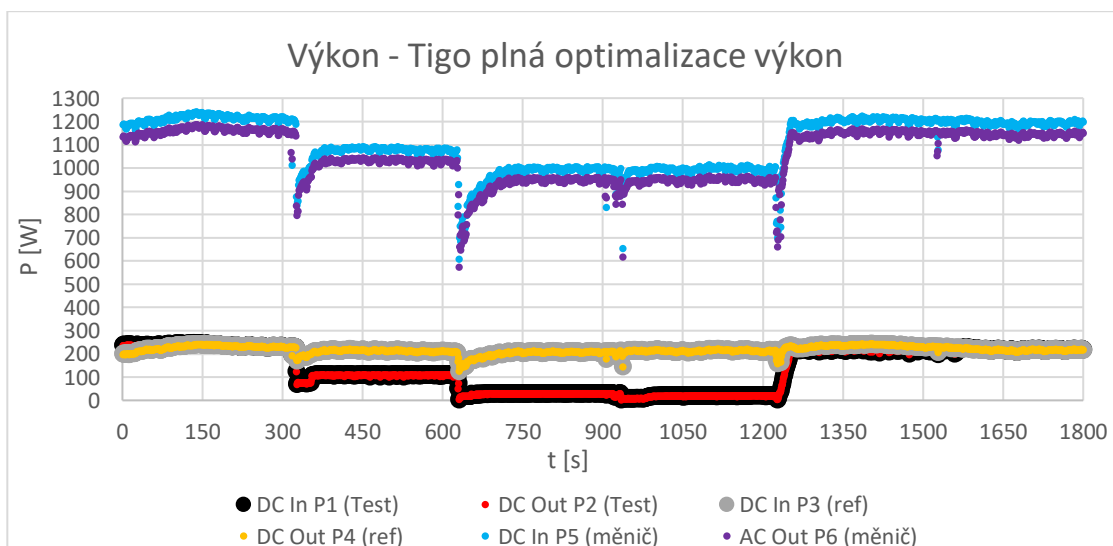
TIGO	Nezastíněné (0-300) s	Stín 1/3 (301-600) s	Stín 2/3 (601-900) s	Stín celý (901- 1200) s	Drát podélně (1201- 1500) s	Drát příčně (1501- 1800) s
U1 [V]	36,76	35,12	34,42	33,83	37,97	38,47
U2 [V]	36,46	19,02	5,17	2,98	32,33	38,14
U3 [V]	37,13	38,47	38,92	38,57	37,32	38,38
U4 [V]	35,26	38,23	38,69	38,33	36,59	38,13
U5 [V]	188,55	194,34	187,57	179,30	187,61	210,48
U6 [V]	235,05	234,74	234,55	234,43	234,68	234,33
I1 [A]	6,46	3,06	0,84	0,56	5,53	5,69
I2 [A]	6,44	5,49	5,15	5,53	6,34	5,68
I3 [A]	6,19	5,50	5,16	5,54	6,27	5,69
I4 [A]	6,45	5,50	5,16	5,54	6,34	5,69
I5 [A]	6,44	5,49	5,15	5,53	6,33	5,67
I6 [A]	4,96	4,36	3,94	4,05	4,85	4,90
P1 [W]	237,29	107,42	28,87	18,84	209,77	218,71
P2 [W]	234,65	104,58	26,60	16,49	206,10	216,47
P3 [W]	229,57	211,55	200,56	213,65	233,74	218,21
P4 [W]	227,22	210,21	199,33	212,28	231,70	216,76
P5 [W]	1212,08	1066,04	962,90	990,63	1186,36	1193,45
P6 [W]	1159,39	1018,88	917,85	944,21	1134,31	1144,24



Graf 16: Průběh napětí Tigo plná optimalizace



Graf 17: Průběh proudů Tigo plná optimalizace

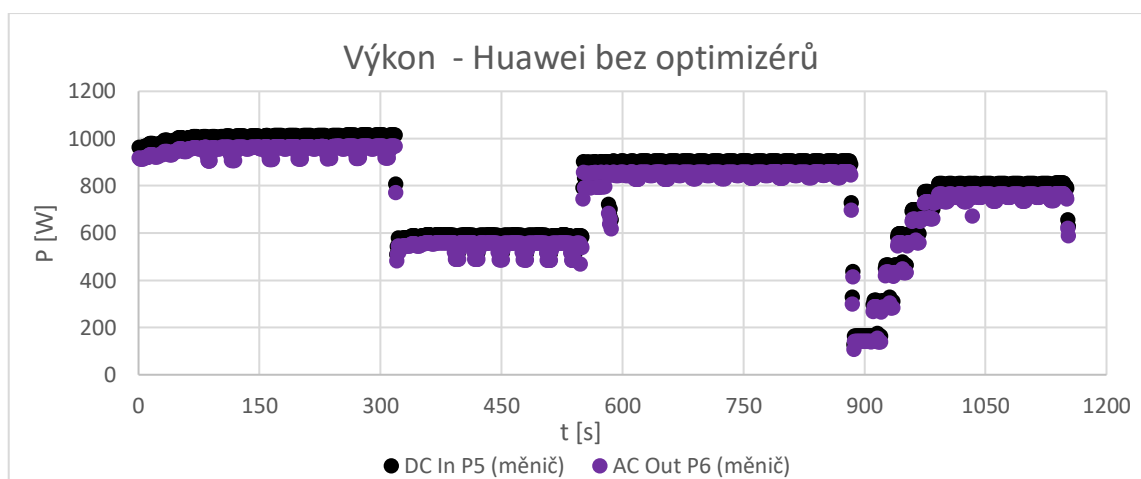


Graf 18: Průběh výkonů Tigo plná optimalizace

### 7.3.3 Měření bez optimizérů

Po odebrání jinak orientovaného modulu ze stringu, bylo provedeno měření bez OPM. String o pěti modulech byl připojen ke střídači Huawei a vzhledem k časové tísní proběhl pouze zkrácený test o 4 krocích (bez zastínění, 1/3 zastíněná, 2/3 zastíněná a celý modul zastíněný). Mezi změnami zastínění byl prostor na ustálení (300 s).

Bez zastínění dosahoval výkon na stringu průměrně 995,6 W. Po zastínění 1/3 modulu se sepnula jedna bypass dioda a výkon skokově klesl na 575, W, což se blíží lokálnímu maximu 623 W na výkonové charakteristice na grafu 8. Po 230 s však MPPT našlo maximum globální 910 W. Při 2/3 zastínění na tomto maximu zůstal a změna proběhla až při plném zastínění, kdy se křivka opět změnila a MPPT trvalo, než opět našel globální maximální bod výkonu na 810 W.

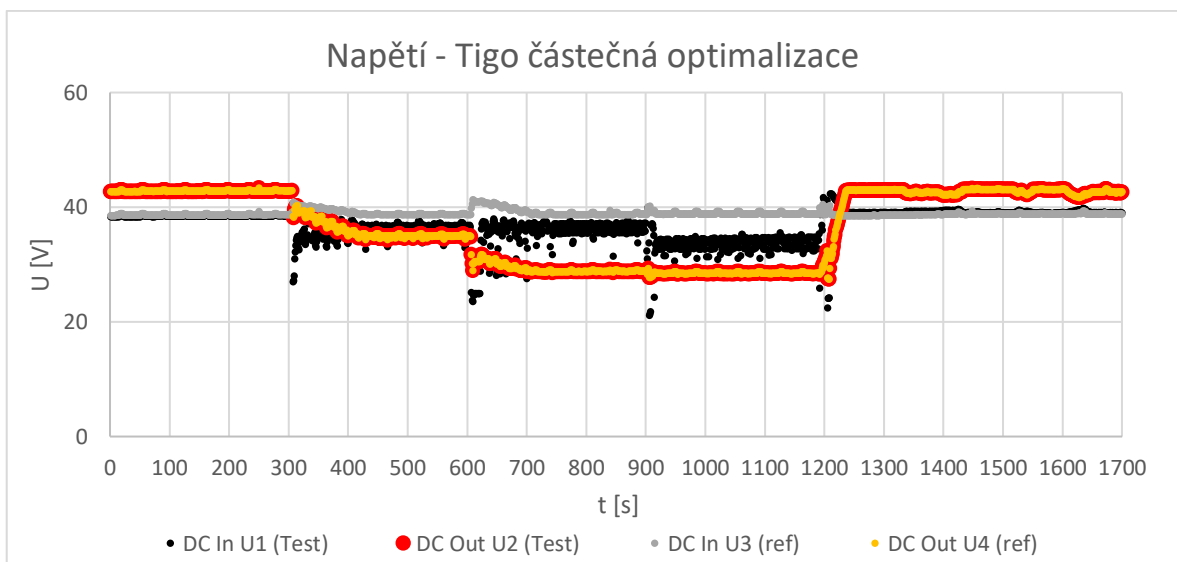


Graf 19: Průběh výkonů na DC a AC straně střídače bez optimizérů

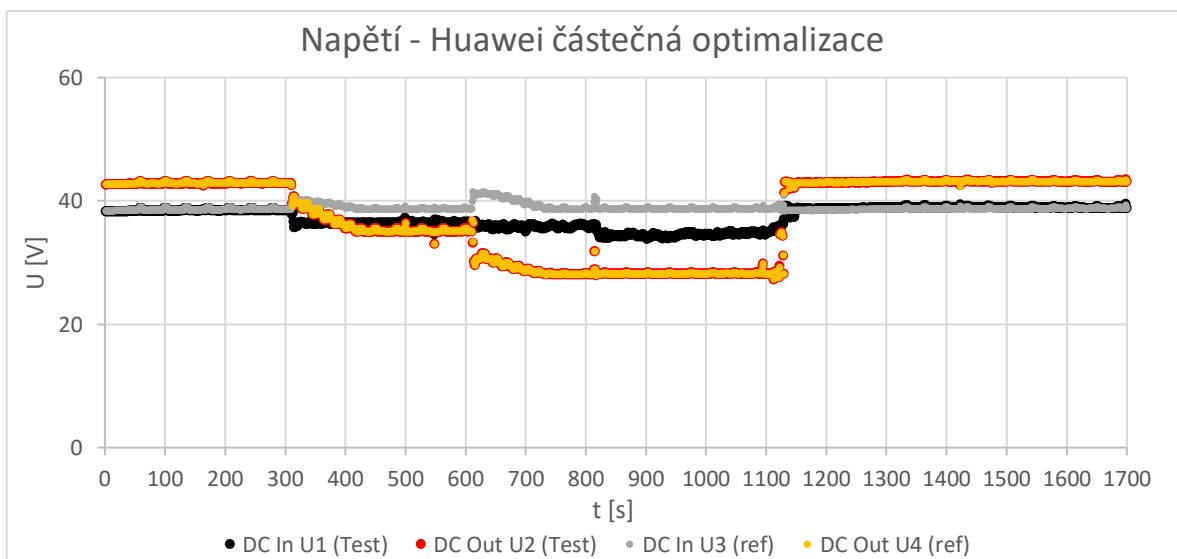
### 7.3.4 Měření částečné optimalizace

Vzhledem k tomu, že optimizéry Tigo a Huawei umožňují pouze částečné osazení, proběhlo prozkoumání jejich chování při tomto typu zapojení. V obou případech bylo na stringu zapojeno pouze 5 modulů, střídač Huawei SUN 2000-3KTL-L1 a jeden testovaný optimizér. Referenční modul byl bez optimizéru. Pokus se opět skládal z 6 kroků (bez stínu, 1/3 zastíněná, 2/3 zastíněná, celé zastíněné, drát podélně, drát příčně), jako u měření plně optimalizované soustavy a každý krok trval 5 minut (300 s).

Jak je vidět z grafů 20, 21, 22 a 23 průběhy napětí a proudu jsou skoro totožné. To stejné platí o výkonech na vstupu a výstupu ze střídače na grafu 24. Pro porovnání celkového výkonu soustavy byl přidána konfigurace bez OPM. Pro nezastíněnou konfiguraci byla mírně výkonnější soustava bez OPM (953,4 W), druhé Tigo (953,1 W) a poslední Huawei (950,8 W). Pro 1/3 zastínění byl výkonnější Huawei (864,29 W), Tigo (863,22 W) a bez OPM dosáhnul nejvýše 828 W. Pro plné zastínění byl opět výkonnější Huawei (774,16 W), a Tigo (771,95 W), bez OPM (741 W). Při jakémkoliv typu zastínění optimalizace zvýšila celkový výkon, oproti konfiguraci bez OPM.

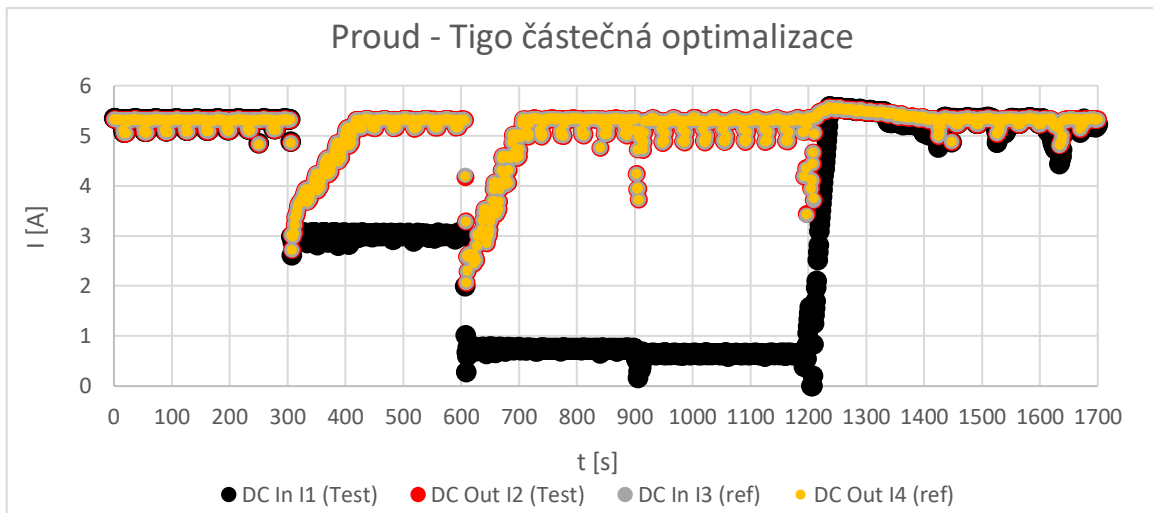


Graf 20: Průběh napětí Tigo při částečné optimalizaci

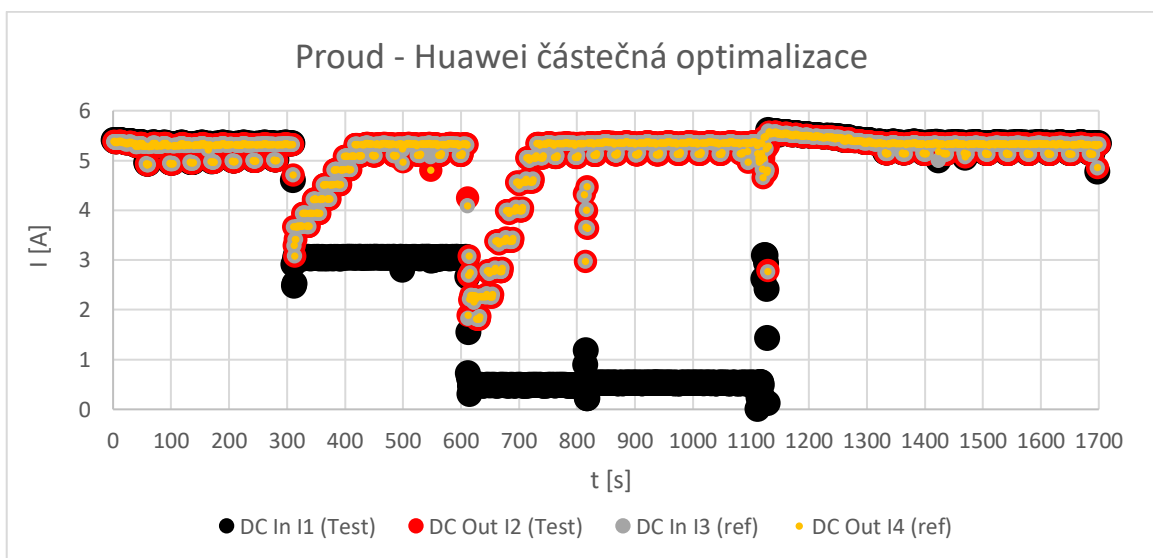


Graf 21: Průběh napětí Huawei při částečné optimalizaci

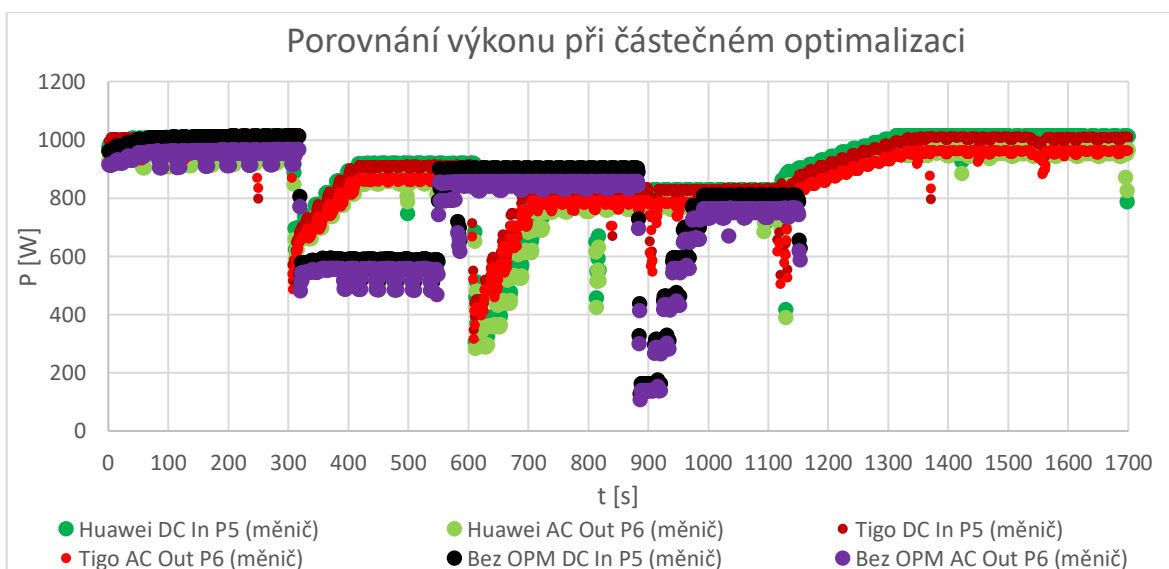




Graf 22: Průběh proudů Tigo při částečné optimalizaci



Graf 23: Průběh proudů Huawei při částečné optimalizaci



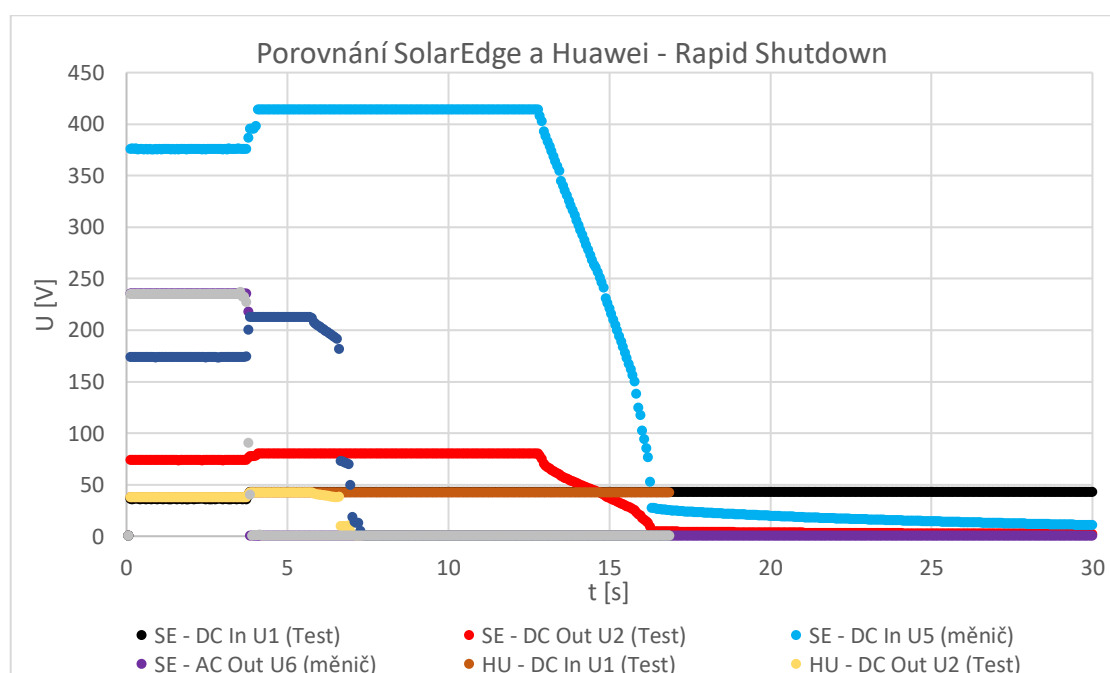
Graf 24: Porovnání výkonu při částečné optimalizaci a bez OPM

### 7.3.5 Měření Rapid Shutdown

Součástí měření bylo také simulace ztráty kontaktu se sítí a s tím spojené spuštění funkce Rapid Shutdown. Iniclace byla provedena rozepnutím jističe v rozvaděči. Testovány byly optimizéry SolarEdge (SE) a Huawei (HU), jelikož Tigo potřebuje pro tuto funkci připojení přes CCA + TAP. Při měření rychlosti odpojení modulů byl na měřícím zařízení nastaven krok 60 ms.

Jak je vidět v grafu 25, tak u SolarEdge ihned po klesnutí napětí na AC straně měniče se skokově zvýší napětí v celém systému. Na výstupu optimizéru je to z 73,5 V až na 80 V a na tomto napětí zůstane 9 s. Následně se spustí Rapid Shutdown, který za 3,6 s sníží napětí na výstupu z optimizéru na 4,5 V. Následně se rychlost zmenšení sníží a na hodnotu 1 V (při zaokrouhlení) se dostane za 16,7 s. Celkový čas potřebný pro RS je 29,3s.

U sestavy Huawei proběhl Rapid Shutdown o poznání rychleji. Celý proces snížení na OPM z 37,2 V na 0 V proběhl za 3,36 s. Po ztracení kontaktu se sítí se opět skokově zvýšilo napětí v celém systému, přičemž na výstupu z optimizéru až na 41,9 V, kde napětí zůstalo po 1,98 s. Následně se spustil RS, který snížil napětí na optimizéru za 1,38 s.



Graf 25: Porovnání rychlosti Rapid Shutdown

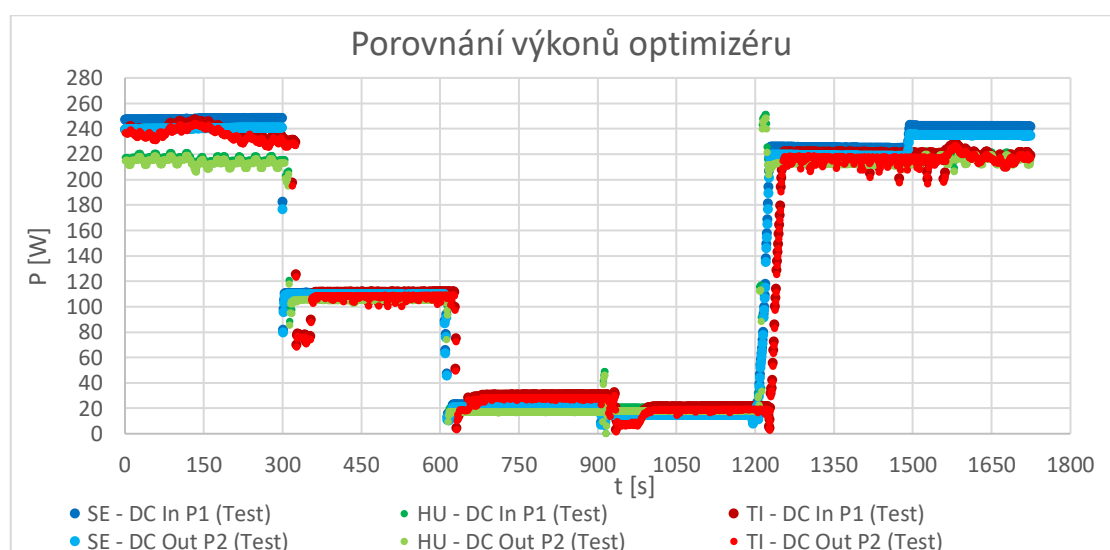
### 7.3.6 Vyhodnocení výsledků optimalizované soustavy

#### Porovnání výkonů OPM

Z naměřených dat vychází, že bez zastínění má nejvyšší výkon optimizér SolarEdge (240 W), druhé je Tigo (234,7 W). Zde je možné, že měření začalo krátce po startu střídače, takže MPPT teprve najížděl do maximálního bodu. Nejnižší výkon produkuje Huawei (215,4 W).

Při zastínění 1/3 modulu produkovali všechny značky přibližně stejný výkon, přičemž nejvyšší výkon má v průměru SE (109,2 W), druhé je Tigo (107,6 W) a nejméně Huawei (104,9 W). Dalším zastíněním se sepnuli obě bypass diody a SE i Huawei produkovali přibližně 20 W, stejně tak u plného zastínění. Toto je nejspíše způsobené zbylým napětím na kondenzátorech na vstupu OPM, jelikož plně zastíněný modul by neměl mít žádný výkon.

Pro drát položený podélně má SE opět lehce vyšší výkon (218,6 W) následuje Tigo (215,2 W) a Huawei (212 W). Stín z drátu příčně již neměl žádný efekt a hodnoty byly pro všechny jako u stavu bez zastínění. Celý průběh výkonů je vidět na grafu 26.

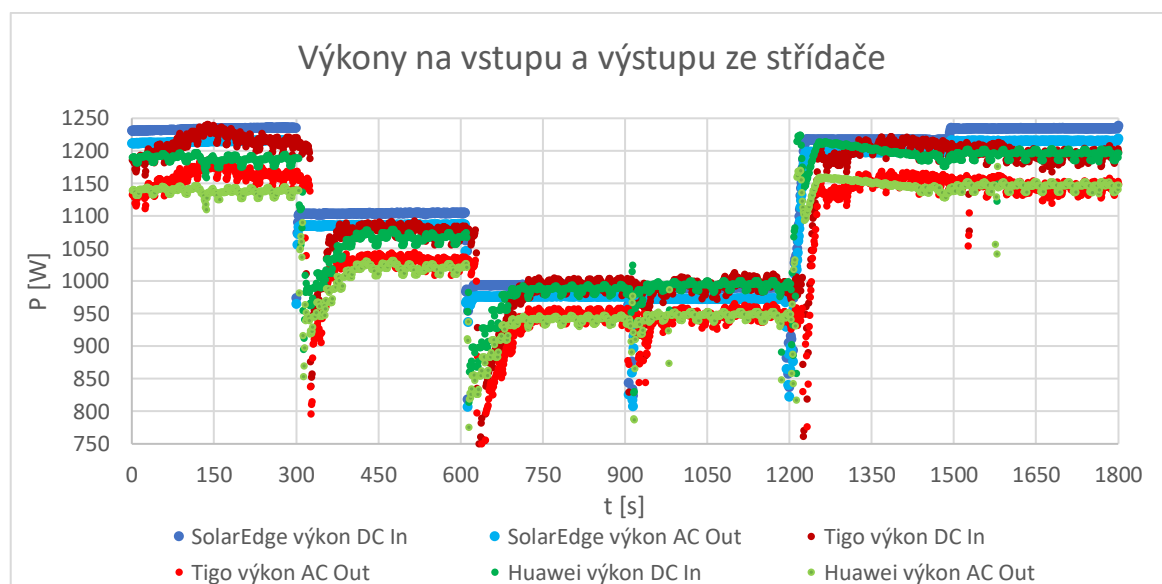


Graf 26: Porovnání výkonů optimizérů

## Porovnání celkového výkonu soustavy

Měření ukázalo, že jednoznačně nejvyšší výkon do sítě má v této konfiguraci v nezastíněném stavu výrobce SE (1213,5 W), následuje Tigo (1159,4 W) a poslední je Huawei (1138 W). Nutno však podotknout, že SolarEdge byl testován jako první, takže vyšší výkon mohl být způsoben nedostatečným zahřátím modulů na provozní teplotu. Tigo bylo naproti tomu měřeno až poslední.

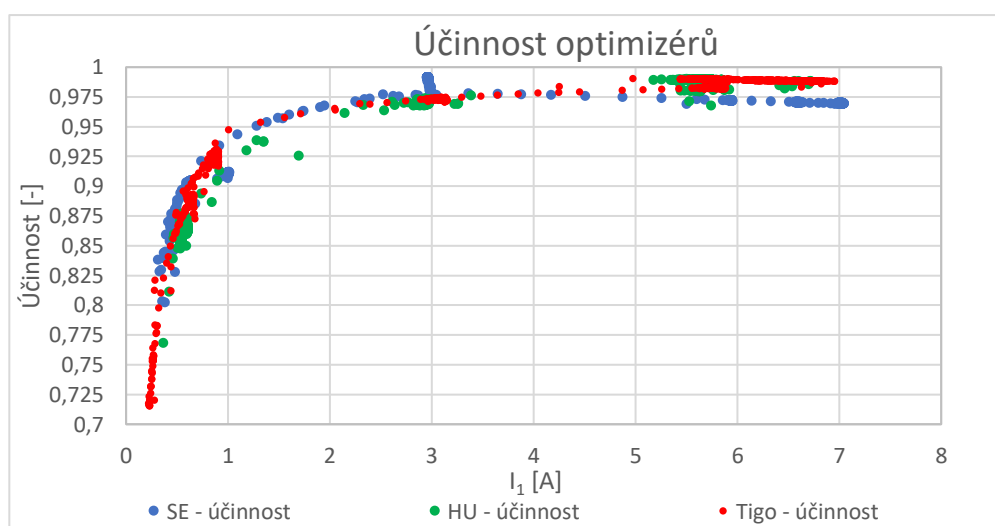
Při 1/3 zastínění měl SE stále nejvyšší produkci (1083,9 W), druhé Tigo (1018,8 W) a třetí Huawei (1007,8 W). Po zastínění 2/3 i celého modulu byly hodnoty podobné. SE (974,4 W) měl výkon nejvyšší a Tigo (917,5 W) mělo nižší než Huawei (928,54 W). Přiložení drátu vodorovně mělo efekt pouze SolarEdge, nikoliv však na Tigo ani Huawei. Porovnání je vidět na grafu 27.



Graf 27: Porovnání výkonů na vstupu a výstupu střídače.

## Porovnání účinnosti OPM v závislosti na vstupním proudu

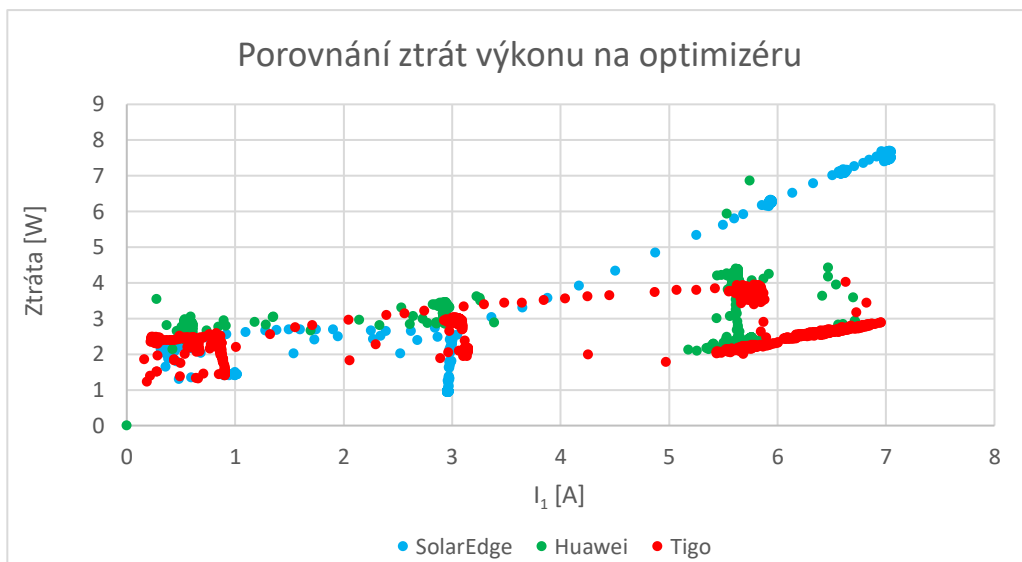
Z naměřených dat bylo také možné určit účinnost a s tím spojené ztráty na optimizéru v závislosti na vstupním proudu do OPM ( $I_1$ ). Při nezastíněném modulu byla účinnost SE (0,97), Huawei (0,989) a Tigo (0,989). Po zastínění 1/3 se účinnost SE zvýšila na 0,99 a byla nejvyšší ze všech šesti měření. Naproti tomu pro Huawei (0,97) a Tigo (0,973) mírně klesla. Následně účinnosti všech optimizérů jen klesaly, jak je vidět na grafu 28. Průměrné hodnoty vstupních proudů pro každý druh zastínění jsou vidět v tabulce 9. Ztráty na optimizéru vyjádřené v procentech jsou na grafu 30.



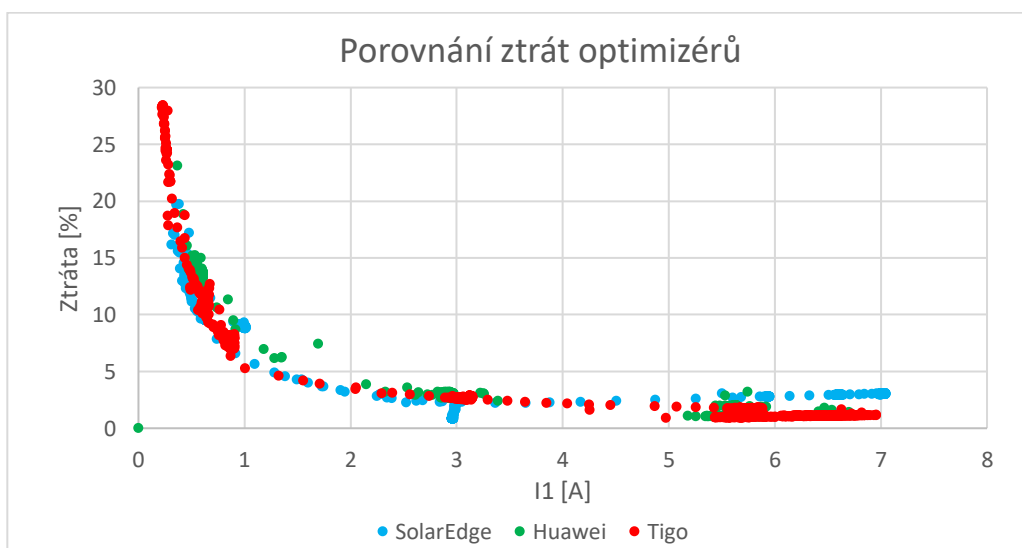
Graf 28: Porovnání účinnosti optimizérů v závislosti na vstupním proudu

Tabulka 9: Vstupní proudy do OPM při různých úrovních zastínění

Vstupní proud $I_1$ [A]	Nezastíněné	Stín 1/3	Stín 2/3	Stín celý	Drát podélně	Drát příčně
SE	7,01	2,96	0,62	0,99	5,46	6,71
Tigo	6,46	3,06	0,84	0,56	5,53	5,69
Huawei	5,68	3,02	0,65	0,60	5,47	5,65



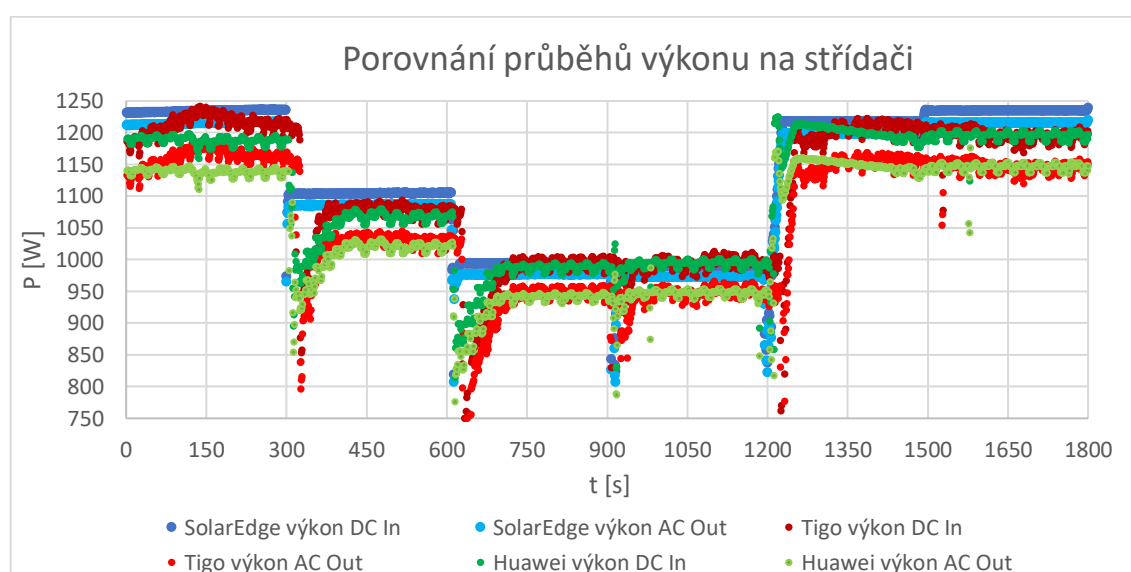
Graf 29: Porovnání absolutních ztrát v závislosti na vstupním proudu



Graf 30: Porovnání ztrát na optimizérech v procentech

## Porovnání rychlosti MPPT

Rychlost náběhu do maximálního pracovního bodu definuje, jak rychle se dokáže MPP Tracker přizpůsobovat dynamicky se měnícímu stínění od okolí. Tím taky určuje možné aplikace. Pro staticky stojící FVE rychlost nemusí být až tak důležitá, když většina stínů jsou od statických objektů (stromy, budovy atd.), avšak pro využití na pohybujících se objektech jako auta, či lodě je důležitý. Stíny od okolních objektů se totiž s jízdou velice rychle mění. Jak je již vidět z grafu 31. SolarEdge mnohem rychleji dosáhl maximálního bodu výkonu (12 s). Tigo (55 s) a Huawei (66 s) jsou o poznání pomalejší, a tedy pro dynamické využití méně vhodné. Vypočítané hodnoty jsou průměr ze 3 najetí MPPT. První je po zastínění 1/3 ( $t_1$ ), druhé po zastínění 2/3 ( $t_2$ ) a třetí je po zastínění drátem podélně ( $t_3$ ). Všechny hodnoty jsou vidět v tabulce 10.



Graf 31: Porovnání průběhů výkonů na střídači

Tabulka 10: Doba náběhu MPPT

	<b>Tigo</b>	<b>Huawei</b>	<b>SolarEdge</b>
<b><math>t_1</math> [s]</b>	55	86	5
<b><math>t_2</math> [s]</b>	90	96	10
<b><math>t_3</math> [s]</b>	20	16	20
<b>Výsledný průměr [s]</b>	<b>55</b>	<b>66</b>	<b>12</b>

## 8 Pravidla pro používání optimizérů

Práce s optimizéry lze rozdělit různě. Já jsem zvolil rozdělení dle velikosti plánované instalace na malé pro rodinné domy, střední a velké. Pozemní instalace jsem přidal, jelikož čím dál více podniků z důvodu nedostatečného prostoru, či únosnosti střechy, staví pozemní FVE na přilehlých pozemcích u budov a vyrobenou energii neprodávají do sítě, ale spotřebovávají ji v přímo v místě.

Vzhledem k tomu, že každá FVE je do jisté míry unikátní, jedná se spíše o doporučení, jak při práci s optimizéry uvažovat. V době psaní práce je situace ohledně výstavby FVE velice dynamická, mění se legislativa a dílů pro FVE je nedostatek (hlavně střídače a optimizéry) a proto jsou níže uvedené ceny pouze orientační.

### 8.1 Instalace na rodinných domech

FVE na rodinných domech se většinou pohybuje výkonově do 10 kWp. Při takto malých instalacích je otázkou, zda optimizéry vůbec využít. Rodinné domy u nás mají povětšinou šikmou střechu a v případě, že je sedlová, tak dvě světové orientace. Pro každou orientaci je tedy možné vytvořit jeden string a využít MPP tracker na střídači. V případě, že v okolí domu nejsou vysoké stromy, nebo se neočekává pravidelný stín od komínu či antény, optimalizace není nutná.

Takovýchto případů je však ve skutečnosti minimum a čím více se podobných problémů na konkrétní střeše vyskytuje, tím více se optimalizace vyplatí. Kromě specifických případů, kdy stín nedopadá pouze na pár modulů, ale pravidelně na většinu, se plná optimalizace nevyplatí, jelikož jak je psáno výše samotné optimizéry mají spotřebu el. energie a můžou naopak celkovou výrobu snížit.

Pro většinu instalací, které mají problém s pravidelným částečným zastíněním, či orientací na různé světové strany na jednom stringu, se vyplatí částečná optimalizace, kterou nabízí výrobci Huawei a Tigo. V případě, že je možné použít v instalaci střídač



Huawei, je to jednoznačně výhodnější vzhledem k obtížnosti instalace a ceně. Cena optimizérů je přibližně podobná (Huawei mírně levnější), ale Tigo potřebuje CCA + Tap (cena přibližně 4500 – 6500 Kč), které instalaci prodražují.

Nabídka Huawei střídačů je však omezena na jednofázové o výkonu 1 – 6 kW a na symetrické třífázové střídače o výkonu 3 – 10 kW, oboje s možností připojení baterie. Ostrovní provoz je možný pouze při přidání tzv. záložního boxu od Huawei. V případě, že střídače požadavky nesplňují, např. je požadavek na asymetrický měnič, je možné využít optimizéry Tigo. Jindy, kdy by byl požadavek na Rapid Shutdown, je možné selektivní rozmístění, tzn. kombinace OPM a odpojovačů od Tigo, nebo plná optimalizace. Při plné optimalizaci lze využít i optimizéry SolarEdge, avšak je nutné počítat s minimálním počtem optimizérů na string. [58], [59]

## 8.2 Střešní instalace střední velikosti

Za střední velikost FVE můžeme označit instalace do 50 kWp, jelikož dle poslední novely energetického zákona právě do výkonu 50 kWp nebude pro výstavbu potřeba stavební povolení, ani licence Energetického regulačního úřadu (ERÚ). Při této velikosti začínají více vystupovat sekundární vlastnosti optimizérů jako Rapid Shutdown a Monitoring. Má tedy smysl uvažovat o plné optimalizaci. V této kategorii je možné využít všechny zmíněné výrobce. SolarEdge i Huawei nabízí podobně jednoduché řešení, avšak pouze Tigo lze kombinovat s asymetrickými střídači. [60]

## 8.3 Velká střešní instalace

Za velkou střešní instalaci můžeme označit FVE od 50 kWp do výkonu několika MWp. Pro výstavbu je nutné stavební povolení a podklady pro něj jsou krom jiných, i vyjádření dotčených orgánů státní správy (DOSS), mezi které se řadí Hasičský záchranný sbor české republiky. Ten posuzuje Požární bezpečnostní řešení stavby (PBŘ) a mohou požadovat řešení s odpojovači na úrovni modulů. Obdobné požadavky mohou vzniknout i u středních a malých instalací, kde PBŘ není vyžadováno stavebním úřadem, ale je potřebné pro posouzení bezpečného provozu instalace v souladu s obecnými požadavky na provozování elektrozařízení.

Snížení napětí na bezpečnou úroveň na úrovni modulu je možné dosáhnout při použití optimizéru pouze u plné optimalizace (Tigo, Huawei) nebo selektivní (Tigo). Tigo a jiní výrobci nabízejí i jiné možnosti Rapid Shutdown řešení, ale většinou nenabízí monitoring na úrovni modulů, což při takto velkých elektrárnách usnadňuje servis. Neposlední v řadě je funkce optimalizace, kdy u takto velkých instalací dochází k problémům se stíněním, ať už od další technologie umístěné na střeše, nebo jiných prvků.

V případě plné optimalizace FVE je možné volit mezi SolarEdge a Tigo. Jak je psáno výše, Huawei podporuje optimizéry pouze pro střídače do výkonu 40 kW, což značně omezuje jeho použití pro větší elektrárny. U elektráren o výkonu vyšších stovek, či tisíců kWp, je takřka nepoužitelné. Do určité míry je možné využít Tigo, avšak většina podporovaných značek střídačů je do výkonu cca 66 kW, střídače o vyšším výkonu jsou pouze od značek Sungrow (max. 100 kW) a Ginlong Solis (max. 125 kW). Použití na FVE v řádech stovek kWp je tedy značně omezené.

Ze třech vybraných optimizérů je pro větší instalace nejvhodnější technologie SolarEdge (střídač max. 120 kWp), přičemž na jeden string jich může být připojeno až 50. Navíc nabízí optimizéry se 2 vstupy, takže je možné osadit dva moduly jedním optimizérem. To je zvláště výhodné u plochých střech, kde se panely často umísťují v orientaci východ-západ. Huawei ani Tigo tuto možnost nemají, u nich je vždy jeden optimizér na jeden modul. [61], [62],

## 8.4 Pozemní instalace

Pozemní instalace se povětšinou optimizéry neosazuje u nás ani v cizině, jelikož na ní neplatí NEC 2017. Zároveň se zde nepředpokládá pravidelné stínění, jelikož v okolí panelů nejsou jiné objekty. Jsou však případy, kdy FVE stojí na hranicích pozemků a na panely dopadá stín, např. od stromu ze soudního pozemku, který však majitel FVE nemůže pokácet. V tomto případě by se mohlo uvažovat o částečné optimalizaci, avšak plná optimalizace většinou nemá vzhledem k vyšší investiční náročnosti smysl. V závislosti na velikosti, by tedy šlo použít technologii Huawei nebo Tigo.

## 9 Závěr

V teoretické části této diplomové práce byly nejprve stručně představeny funkce optimizéru výkonu pro solární moduly. Byla popsána zahraniční legislativa týkající se rychlého snížení napětí na úrovni modulu. Navázáno bylo rešerší výrobců vyskytujících se na tuzemském trhu a popisem jejich řešení optimizérů současných, ale i historických. Krom toho byly výrobci také popsáni z pohledu dostupností informací, podpůrných programů, či technické podpory. V závěru teoretické části byly uvedeni výrobci optimizérů, kteří se vyskytují v zahraničí. Jako zajímavou náhradou za systém Tigo se ukázalo řešení od GNE, které pracuje na podobném principu. Vzhledem k omezenému množství informací je však potřeba provést další výzkum.

V úvodu praktické části byly navrženy tři možné verze experimentu, z nichž dvě byly následně provedeny. Nejdříve bylo provedeno měření pomocí malého solárního simulátoru v kombinaci se střešními moduly. Ukázalo se však, že ho pro tyto potřeby není možné použít, zvláště kvůli nízkému osvitu venkovních panelů.

Měření na velkém solárním simulátoru již bylo úspěšné a byly proměřeny všechny tři vybrané optimizéry. Při plné optimalizaci měl nejvyšší výkon bez zastínění optimizér SE, pak Tigo a nejnižší měl Huawei. Při 1/3 zastínění modul nebyl rozdíl výkonů tak velký, ale opět měl SE nejvyšší výkon, Tigo bylo druhé a nejmenší měl Huawei. Při měření rychlosti snížení napětí na modulech po odpojení ze sítě byl značně rychlejší Huawei než SolarEdge. Z dat bylo zjištěno, že při plném osvitu mají vyšší účinnost optimizéry Tigo a Huawei než SE. Účinnost Huawei a Tigo se po zastínění 1/3 modulu snížila, ale u SE se naopak zvýšila a byla nejvyšší ze všech kroků experimentu.

Při částečné optimalizaci Huawei a Tigo byl celkový výkon na AC střídače skoro totožný, avšak krom situace bez zastínění byl výkon vyšší než u konfigurace bez OPM. Na závěr bylo sepsáno doporučení pro používání v závislosti na velikost výkonu instalace. Cíle diplomové práce byly splněny.

## 10 Seznam použité literatury

- [1] MASTNÝ, Petr. Obnovitelné zdroje elektrické energie. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04937-2.
- [2] DAVID, Petr. Systém pro zatížení experimentálního PV panelu. Praha, 2015. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Pavel Hrzina Ph.D.
- [3] LIU, Hwa-Dong, Chang-Hua LIN, Kai-Jun PAI a Chien-Ming WANG. A GMPPT algorithm for preventing the LMPP problems based on trend line transformation technique. *Solar Energy*. 2020, (198), 53-67. ISSN 0038-092X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.01.049>
- [4] BECHNÍK, Bronislav. Nejpoužívanější pojmy ve fotovoltaice. David Štíčka - fotovoltaické systémy[online]. Radslavice, 2014, 29.9.2014 [cit. 2023-01-01]. Dostupné z: <http://www.sticka.cz/pojmy/>
- [5] A. ELBASET, Adel. Improving the Resiliency of a PV Stand-Alone with Energy Storage. In: *Performance Analysis of Photovoltaic Systems with Energy Storage Systems*. 1. Switzerland: Springer Cham, 2019, s. 56. ISBN 978-3-030-20896-7. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1007/978-3-030-20896-7](https://doi.org/10.1007/978-3-030-20896-7)
- [6] Selection of non-isolated DC-DC converters for solar photovoltaic system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier, September 2017, 2017(76), 1230-1247. ISSN 1879-0690. Dostupné z: [doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.130](http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.130)
- [7] Stejnoseměrné měniče napětí. *Výuka hradební* [online]. Výuka hradební, 2022 [cit. 2023-01-08]. Dostupné z: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjXibuTspn7AhWZgv0HHYCKBtYQFnoECBQQAQ&url=https%3A%2F%2Fvyuka.hradebni.cz%2Fmod%2Fresource%2Fview.php%3Fid%3D12943&usg=AOvVaw1MzsPf5eIuc9KDZUvnUgu9>
- [8] Everything You Need to Know About Rapid Shutdown. Tigo Energy [online]. California: Tigo Energy, c2007-2022, 23 March 2022 [cit. 2023-01-01]. Dostupné z: <https://www.tigoenergy.com/post/blog-everything-you-need-to-know-about-rapid-shutdown>

- [9] IVINS, Rick. Value engineering tips: 2017 NEC 690.12 Rapid Shutdown – Important Changes. Pure power engineering [online]. Hoboken: Pure power engineering, 2019 [cit. 2023-01-01]. Dostupné z: <https://www.purepower.com/blog/2017-nec-690.12-rapid-shutdown-important-changes>
- [10] ZULKIFLI RAMLI, Mohd a Zainal SALAM. Performance evaluation of dc power optimizer (DCPO) for photovoltaic (PV) system during partial shading. *Renewable Energy*. August 2019, 2019(139), 1336-1354. ISSN 0960-1481. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.02.072>
- [11] FRANKE, Toke. The Impact of Optimizers for PV-Modules: A comparative study. Denmark, 2019. Research report. University of Southern Denmark.
- [12] SolarEdge [online]. Herzliya: SolarEdge Technologies, 2021 [cit. 2023-01-01]. Dostupné z: <https://www.solaredge.com/index.php/>
- [13] Memodo [online]. Praha: Memodo, 2022 [cit. 2023-01-01]. Dostupné z: <https://www.memodo.cz>
- [14] IfTECH [online]. Horní Moštěnice: ifTECH, c2023 [cit. 2023-01-01]. Dostupné z: <https://shop.iftech.cz>
- [15] ARGOS ELEKTRO [online]. Praha: ARGOS ELEKTRO, c2023 [cit. 2023-01-01]. Dostupné z: <https://argos.cz>
- [16] SolarEdge Safety & Monitoring Interface 35A, SMI-35. *Memodo* [online]. Praha: Memodo, 2022 [cit. 2023-01-07]. Dostupné z: <https://www.memodo.cz/prislusenstvi/solaredge/689/solaredge-safety-monitoring-interface-35a-smi-35>
- [17] Supported devices. *SolarEdge* [online]. Herzliya: SolarEdge Technologies, 2021 [cit. 2023-01-08]. Dostupné z: <https://www.solaredge.com/articles/se-supported-devices>
- [18] Power Optimizer with IndOPTM Technology. SolarEdge[online]. Herzliya: SolarEdge Technologies, 2021, November 2021 [cit. 2023-01-01]. Dostupné z: <https://knowledge-center.solaredge.com/sites/kc/files/se-p-series-indop-add-on-power-optimizer-datasheet.pdf>

- [19] SolarEdge Safety and Monitoring Interface. SolarEdge[online]. Herzliya: SolarEdge Technologies, 2016, June 2016 [cit. 2023-01-01]. Dostupné z: <https://knowledge-center.solaredge.com/sites/kc/files/se-pb-interface-for-non-solaredge-inverters-datasheet.pdf>
- [20] Nahrání hodinových meteorologických dat do Designeru. *SolarEdge* [online]. Herzliya: SolarEdge Technologies, 2019, Feb 2019 [cit. 2023-01-07]. Dostupné z: <https://knowledge-center.solaredge.com/sites/kc/files/designer-hourly-meteorological-data-file-upload-cz.pdf>
- [21] SolarEdge designer - Solar Design Tool. *SolarEdge* [online]. Herzliya: SolarEdge Technologies, 2021 [cit. 2023-01-07]. Dostupné z: <https://www.solaredge.com/us/products/installer-tools/designer#/>
- [22] Photomate - distributoři. *Photomate* [online]. České Budějovice: Photomate, 2008 [cit. 2023-01-07]. Dostupné z: <https://www.photomate.eu/cs/distributori/>
- [23] GNE - produkty. *GNE Optymalizacja mocy* [online]. Gorlice: Afore Polska Sp. z o.o., 2020 [cit. 2023-01-07]. Dostupné z: <https://gne.com.pl/produkty/>
- [24] AMG Power Solutions - Solar Grid Tie Inverter. *AMG Power Solutions* [online]. Wuxi: AMG Power Solutions Co., c2017 [cit. 2023-01-07]. Dostupné z: <http://amgpowersolutions.com/index.php/list/index/g/e/id/6.html>
- [25] 460W/600W 3V-70V Input External Optimizer Athena600 For Solar Panel System Optimazation Voltage-Limiting Anti-Hotspot, IP65. *AliExpress* [online]. China: AliExpress.com, c2010-2022 [cit. 2023-01-07]. Dostupné z: [https://www.aliexpress.com/item/1005001627406071.html?spm=a2g0o.productlist.main.41.3d787887OGBIjU&algo\\_pvid=2170a5b6-4d8e-4d7b-985d-8d83187bff5f&algo\\_exp\\_id=2170a5b6-4d8e-4d7b-985d-8d83187bff5f-20&pdp\\_ext\\_f=%7B%22sku\\_id%22%3A%2212000029155858987%22%7D&pdp\\_npi=2%40dis%21CZK%214124.53%211897.29%21%21%2149.41%21%21%402100b1a616680888785397420d0753%2112000029155858987%21sea&curPageLogUid=4g4jvGXSCvZD](https://www.aliexpress.com/item/1005001627406071.html?spm=a2g0o.productlist.main.41.3d787887OGBIjU&algo_pvid=2170a5b6-4d8e-4d7b-985d-8d83187bff5f&algo_exp_id=2170a5b6-4d8e-4d7b-985d-8d83187bff5f-20&pdp_ext_f=%7B%22sku_id%22%3A%2212000029155858987%22%7D&pdp_npi=2%40dis%21CZK%214124.53%211897.29%21%21%2149.41%21%21%402100b1a616680888785397420d0753%2112000029155858987%21sea&curPageLogUid=4g4jvGXSCvZD)
- [26] Solar Point 700w Solar Optimizer Rapid Shut Down Improve Solar Energy Power Optimizer. *Alibaba.com* [online]. Hangzhou: Alibaba Group Holding Limited, c1999-2022 [cit. 2023-01-07]. Dostupné z: [https://www.alibaba.com/product-detail/Solar-Point-700w-Solar-Optimizer-Rapid\\_1600272933301.html](https://www.alibaba.com/product-detail/Solar-Point-700w-Solar-Optimizer-Rapid_1600272933301.html)

- [27] SWT power - Solar power optimizer. *SWT power* [online]. Jimei: Xiamen SWT Power Tech. Co., c2009 [cit. 2023-01-07]. Dostupné z: <https://swt-power.com/products/solar-power-optimizer>
- [28] SUNGO - Main products. *SUNGO - Go with sunshine* [online]. Jiangsu: Taizhou Sungo Power Energy Technology Co., 2019 [cit. 2023-01-07]. Dostupné z: <http://www.sungoess.com/epoweroptimizer/>
- [29] SUNGO-OPT. *SUNGO - Go with sunshine* [online]. Jiangsu: Taizhou Sungo Power Energy Technology Co., 2019 [cit. 2023-01-07]. Dostupné z: <http://www.sungoess.com/uploadfile/pdf/SUNGO-OPT%20-%20600W.pdf>
- [30] Solar Intelligent Optimization Series. *SPO.cn* [online]. Shanghai: Shanghai SDO Energy Tech Co., c2023 [cit. 2023-01-07]. Dostupné z: <https://spo.cn/#/series/smart>
- [31] Application Note: SolarEdge Fixed String Voltage, Concept of Operation. *SolarEdge* [online]. Herzliya: SolarEdge Technologies, 2019, Feb 2019 [cit. 2023-01-07]. Dostupné z: [https://knowledge-center.solaredge.com/sites/kc/files/se\\_application\\_fixed\\_string\\_voltage.pdf](https://knowledge-center.solaredge.com/sites/kc/files/se_application_fixed_string_voltage.pdf)
- [32] Solar Power Optimization. *SPO.cn* [online]. Shanghai: Shanghai SDO Energy Tech Co., c2023 [cit. 2023-01-07]. Dostupné z: <https://spo.cn/#/visitor/info/powerInfo/powerData>
- [33] SmartDesign 2.0. *SmartDesign* [online]. Beijing: Huawei Technologies Co. Ltd., c2012-2022 [cit. 2023-01-07]. Dostupné z: <https://eu5.smartdesign.huawei.com/#/login>
- [34] 450W Solar Grid Tie Vital Power Optimizer. *AliExpress* [online]. China: AliExpress.com, c2010-2022 [cit. 2023-01-07]. Dostupné z: [https://www.aliexpress.com/item/1005003043423791.html?spm=a2g0o.productlist.main.65.3d787887OGBIjU&algo\\_pvid=2170a5b6-4d8e-4d7b-985d-8d83187bff5f&algo\\_exp\\_id=2170a5b6-4d8e-4d7b-985d-8d83187bff5f-32&pdp\\_ext\\_f=%7B%22sku\\_id%22%3A%2212000023417717064%22%7D&pdp\\_npi=2%40dis%21CZK%212253.06%212253.06%21%21%21%21%21%402100b1a616680888785397420d0753%2112000023417717064%21sea&curPageLogUid=d27IBPDy02W2](https://www.aliexpress.com/item/1005003043423791.html?spm=a2g0o.productlist.main.65.3d787887OGBIjU&algo_pvid=2170a5b6-4d8e-4d7b-985d-8d83187bff5f&algo_exp_id=2170a5b6-4d8e-4d7b-985d-8d83187bff5f-32&pdp_ext_f=%7B%22sku_id%22%3A%2212000023417717064%22%7D&pdp_npi=2%40dis%21CZK%212253.06%212253.06%21%21%21%21%21%402100b1a616680888785397420d0753%2112000023417717064%21sea&curPageLogUid=d27IBPDy02W2)
- [35] GNE TEK - Products. *GNE TEK* [online]. Jiangsu: Jiangsu GNE New Energy Technology Co., c2019 [cit. 2023-01-07]. Dostupné z: <https://www.gnetek.com/article?cat=ENProduct>

- [36] GNE TEK - Data Cloud Center. *GNE TEK* [online]. Jiangsu: Jiangsu GNE New Energy Technology Co., c2019 [cit. 2023-01-07]. Dostupné z: [https://www.gnetek.com/uploads/article/thumb/20200415092202\\_5e9661ba3b4a3.pdf](https://www.gnetek.com/uploads/article/thumb/20200415092202_5e9661ba3b4a3.pdf)
- [37] GNE TEK - Home office. *GNE TEK* [online]. Jiangsu: Jiangsu GNE New Energy Technology Co., c2019 [cit. 2023-01-07]. Dostupné z: <https://afore.gnetek.com/#/stationReport>
- [38] GNE TEK - Data Processing Device. *GNE TEK* [online]. Jiangsu: Jiangsu GNE New Energy Technology Co., c2019 [cit. 2023-01-07]. Dostupné z: [https://www.gnetek.com/uploads/article/thumb/20200622110421\\_5ef01fb583115.pdf](https://www.gnetek.com/uploads/article/thumb/20200622110421_5ef01fb583115.pdf)
- [39] Honeybee 650 | Optymalizator mocy. *GNE Optymalizacja mocy* [online]. Gorlice: Afore Polska Sp. z o.o., 2020 [cit. 2023-01-07]. Dostupné z: <https://i0.wp.com/gne.com.pl/wp-content/uploads/2020/12/hb400-min.png?resize=245%2C400&ssl=1>
- [40] Huawei safety box. *IfTECH* [online]. Horní Moštěnice: ifTECH, c2023 [cit. 2023-01-07]. Dostupné z: [https://shop.iftech.cz/4433-large\\_default/huawei-safety-box.jpg](https://shop.iftech.cz/4433-large_default/huawei-safety-box.jpg)
- [41] HUAWEI Smart PV Optimizer SUN2000-450W-P. *SKE - SOLAR* [online]. Steyregg: SKE Engineering, c2023 [cit. 2023-01-07]. Dostupné z: <https://www.ske-solar.com/en/product/huawei-smart-sun2000-450w-p-optimizer/>
- [42] Smart PV Optimizer. *Photomate* [online]. České Budějovice: Photomate, 2008 [cit. 2023-01-07]. Dostupné z: [https://www.photomate.eu/wp-content/themes/sitetheme/assets/CZ\\_Sheet\\_PV-optimizer-450\\_20201006\\_210x297.pdf](https://www.photomate.eu/wp-content/themes/sitetheme/assets/CZ_Sheet_PV-optimizer-450_20201006_210x297.pdf)
- [43] Smart PV Optimizer. *SKE - SOLAR* [online]. Steyregg: SKE Engineering, c2023 [cit. 2023-01-07]. Dostupné z: <https://www.ske-solar.com/wp-content/uploads/2022/06/Datenblatt-fuer-Huawei-SUN2000-600W-P-Optimizer-Englisch.pdf>
- [44] Tigo - systémy. *Tigo - energy* [online]. California: Tigo Energy, c2007-2021 [cit. 2023-01-07]. Dostupné z: <https://ei.tigoenergy.com>



- [45] FusionSolar. *FusionSolar* [online]. Beijing: Huawei Technologies Co., c2011-2023 [cit. 2023-01-07]. Dostupné z: <https://eu5.fusionsolar.huawei.com/unisso/login.action?decision=1&service=https%3A%2F%2Fregion01eu5.fusionsolar.huawei.com%2Funisess%2Fv1%2Fauth%3Fservice%3D%252Fnetecowebext%252Fhome%252Findex.html%2523%252FLOGIN>
- [46] SmartDesign. *SmartDesign* [online]. Beijing: Huawei Technologies Co., c2016-2021 [cit. 2023-01-07]. Dostupné z: <https://eu.smartdesign.huawei.com:31943/login/login.action>
- [47] SUN2000P-375 W Smart PV Optimizer Quick Guide. *Support Huawei* [online]. Shenzhen: Huawei Technologies Co., 2018 [cit. 2023-01-07]. Dostupné z: <https://support.huawei.com/enterprise/en/doc/EDOC1100034118>
- [48] Monitoring Platform User's Guide For System Owners. *SolarEdge* [online]. Herzliya: SolarEdge Enterprises, August 2021 [cit. 2023-01-07]. Dostupné z: <https://knowledge-center.solaredge.com/sites/kc/files/solaredge-monitoring-portal-user-guide.pdf>
- [49] Tigo Energy. *Tigo Energy* [online]. California: Tigo Energy, c2007-2022 [cit. 2023-01-07]. Dostupné z: <https://www.tigoenergy.com>
- [50] Tigo Flex MLPE. *Tigo Energy* [online]. California: Tigo Energy, c2007-2022 [cit. 2023-01-07]. Dostupné z: [https://assets-global.website-files.com/5fad551d7419c7a0e9e4aba4/600ee8d7e6137daee20e1b33\\_Cloud%20Connect%20Advanced%20\(CCA\)%20and%20Accessories%20Kit%20\(TÜV\).pdf](https://assets-global.website-files.com/5fad551d7419c7a0e9e4aba4/600ee8d7e6137daee20e1b33_Cloud%20Connect%20Advanced%20(CCA)%20and%20Accessories%20Kit%20(TÜV).pdf)
- [51] Installation Manual TS4 UHD-Core with TAP and CCA. *Tigo Energy* [online]. California: Tigo Energy, c2007-2022 [cit. 2023-01-07]. Dostupné z: [https://assets-global.website-files.com/5fad551d7419c7a0e9e4aba4/600ef15d2fe99669db194a16\\_Installation%20Manual%20-%20TS4%2C%20CCA%2C%20TAP%20\(UL\).pdf](https://assets-global.website-files.com/5fad551d7419c7a0e9e4aba4/600ef15d2fe99669db194a16_Installation%20Manual%20-%20TS4%2C%20CCA%2C%20TAP%20(UL).pdf)
- [52] Tigo Energy Limited Warranty. *Tigo Energy* [online]. California: Tigo Energy, c2007-2022 [cit. 2023-01-07]. Dostupné z: [https://assets-global.website-files.com/5fad551d7419c7a0e9e4aba4/618997cd8c3a542b5d677556\\_Tigo%20Energy%20Product%20Warranty%20-%20updated%2010.5.21.pdf](https://assets-global.website-files.com/5fad551d7419c7a0e9e4aba4/618997cd8c3a542b5d677556_Tigo%20Energy%20Product%20Warranty%20-%20updated%2010.5.21.pdf)

- [53] Tigo Design Tool. *Tigo Energy* [online]. California: Tigo Energy, c2007-2022 [cit. 2023-01-07]. Dostupné z: <https://smart.tigoenergy.com/tap/>
- [54] Tigo System Data - Storage and Transfer. *Tigo Energy* [online]. California: Tigo Energy, c2007-2022 [cit. 2023-01-07]. Dostupné z: <https://support.tigoenergy.com/hc/en-us/articles/205444058-Tigo-System-Data-Storage-and-Transfer>
- [55] PLOUHAR, Adam, Technik Memodo [ústní sdělení]. Praha, 20.10.2022.
- [56] POKORNÝ, Vít, Solutions Manager Photomate [ústní sdělení] Praha, 21.10.2022.
- [57] TS4 Systems - Methods of Deployment. *Tigo Energy*[online]. California: Tigo Energy, c2007-2021, 18.11.2022 [cit. 2023-01-01]. Dostupné z: <https://support.tigoenergy.com/hc/en-us/articles/360024860193-TS4-Systems-Methods-of-Deployment>
- [58] Datalogger Cloud Connect Tigo CCA Kit + TAP. *DEK* [online]. Praha: DEK, c2023 [cit. 2023-01-09]. Dostupné z: [https://www.dek.cz/produkty/detail/8500618202-fve-cloud-connect-tigo-cca-kit-tap?gclid=EAIaIQobChMIIsIizqfe6\\_AIVS-R3Ch39oQ-eEAQYAiABEgLSIPD\\_BwE](https://www.dek.cz/produkty/detail/8500618202-fve-cloud-connect-tigo-cca-kit-tap?gclid=EAIaIQobChMIIsIizqfe6_AIVS-R3Ch39oQ-eEAQYAiABEgLSIPD_BwE)
- [59] FusionSolar Residential. *Huawei* [online]. Beijing: Huawei Technologies Co., c2022 [cit. 2023-01-09]. Dostupné z: <https://solar.huawei.com/eu/Products/FusionSolarResidential>
- [60] Vláda připravuje zjednodušení pro malé FVE: do 50 kWp bez licence a stavebního povolení. *Solární asociace* [online]. Praha: Solární asociace, 2022 [cit. 2023-01-09]. Dostupné z: <https://www.solarniasociace.cz/cs/aktualne/30049-vlada-pripravuje-zjednoduseni-pro-male-fve--do-50-kwp-bez-licence-a-stavebniho-povoleni>
- [61] Územní plánování a stavební řád. *Hasičský záchranný sbor ČR* [online]. Praha: Generální ředitelství Hasičského záchranného sboru ČR, 2019 [cit. 2023-01-09]. Dostupné z: <https://www.hzscr.cz/clanek/uzemni-planovani-a-stavebni-rad.aspx>
- [62] Inverter compatibility. *Tigo Energy* [online]. California: Tigo Energy, c2007-2022 [cit. 2023-01-09]. Dostupné z: <https://www.tigoenergy.com/inverter-compatibility>

## 11 Seznam obrázků

Obrázek 1: Náhradní schéma fotovoltaického článku dostupné z [1].....	11
Obrázek 2: Schéma Buck měniče, dostupné z: [6].....	17
Obrázek 3: Schéma Buck-boost měniče, dostupné z: [6].....	18
Obrázek 4: Oblasti trackingu pro Buck-boost měnič, dostupné z [6] .....	19
Obrázek 5: Země, které vyžadují podobná kritéria jako NEC Rapid shutdown, dostupné z [8].....	20
Obrázek 6: Schéma požadavků na Rapid shutdown NEC 2017, dostupné z [9]...	21
Obrázek 7: Typické zapojení optimizérů, dostupné z [10] .....	22
Obrázek 8: Koncept funkce optimizérů SolarEdge, dostupné z: [57].....	24
Obrázek 9: SolarEdge SMI jednotka, dostupné z [13].....	25
Obrázek 10: Optimizér SolarEdge serie S, dostupné z: [12].....	26
Obrázek 11: SolarEdge designer, dostupné z [21] .....	28
Obrázek 12: Dashboard SolarEdge monitorovací platformy, dostupné z: [48] ....	29
Obrázek 13: Diagram optimizéru SUN 2000P-375W, dostupné z [47].....	30
Obrázek 14: Huawei Safety box dostupné z: [40].....	30
Obrázek 15: Huawei SUN 2000-450P optimizér dostupné z: [41].....	31
Obrázek 16: Fusion Solar monitorovací aplikace dostupné z: [45] .....	32
Obrázek 17: Smart Design verze 1: Naklonění modulů, dostupné z: [46].....	33
Obrázek 18: Smart Design verze 1.0: Výsledný návrh, dostupné z [46] .....	33
Obrázek 19: Smart Designer verze 2.0: Rozložení panelů, dostupné z: [56].....	33
Obrázek 20: Smart Designer verze 2.0: Výsledný návrh, dostupné z: [56] .....	34
Obrázek 21: Porovnání funkcí MLPE od Tigo, dostupné z: [49] .....	34
Obrázek 22: Seznam značek, s kterými MLPE Tigo spolupracují, dostupné z: [49] .....	35
Obrázek 23: Tigo TAP a CCA, dostupné z [49] .....	36
Obrázek 24: Plná optimalizace systémem Tigo, dostupné z: [16] .....	36
Obrázek 25: TAP Design Tool, dostupné z: [53].....	37
Obrázek 26: Graf roční výroby se složkou Reclaimed Energy, dostupné z: [55].	38
Obrázek 27: Optimizér HoneyBee 650, dostupné z: [39] .....	39
Obrázek 28: Příklad využití Beehive + Swarm dostupné z: [38].....	40
Obrázek 29: Monitorovací platforma GNE dostupné z: [36].....	41
Obrázek 30: AMG optimizéry dostupné z: [24].....	41

Obrázek 31: Solar Point optimizér (vlevo) a gateway (vpravo) dostupné z: [30].	42
Obrázek 32: SPO monitorovací platforma, dostupné z: [32] .....	43
Obrázek 33: SWT optimizér dostupné z:[31].....	43
Obrázek 34: Optimizér SUNGO-OPT dostupné z: [29] .....	44
Obrázek 35: Solární moduly (245 W) na světlíku UCEEB.....	47
Obrázek 36: Solární Simulátor SAS.....	48
Obrázek 37: Schéma zapojení optimizérů střecha + laboratoř.....	49
Obrázek 38: Homogenita ozáření před kalibrací (vlevo) a výsledná (vpravo), pyranometr (uprostřed) .....	51
Obrázek 39: Ukázka plného zastínění polystyrenem, drát podélně, drát šikmo ...	52
Obrázek 40: Schéma měřených míst .....	54
Obrázek 41: Měření proudu (vlevo) a napětí jednoho pólu (vpravo).....	55
Obrázek 42: Experimentální rozvaděč (vlevo) a zapojení kanálů Zimmer (vpravo) .....	55
Obrázek 43: Rozložení 6 modulů v různé orientaci .....	55
Obrázek 44: Schéma pro tabulku průběhů .....	57

## 12 Seznam tabulek

Tabulka 1: Chování algoritmu Perturb and Observe, dostupné z: [2].....	16
Tabulka 2: Porovnání funkcí při různých zapojeních .....	26
Tabulka 3: Porovnání výrobců optimizérů SolarEdge, Huawei, Tigo .....	45
Tabulka 4: Výsledky zapojení na solární simulátor - Huawei .....	49
Tabulka 5: Výsledky zapojení na solární simulátor - Tigo .....	50
Tabulka 6: Průměrné hodnoty napětí, proudu a výkonu pro každé zastínění - SolarEdge.....	57
Tabulka 7: Průměrné hodnoty napětí, proudu a výkonu pro každé zastínění - Huawei.....	59
Tabulka 8: Průměrné hodnoty napětí, proudu a výkonu pro každé zastínění - Tigo .....	61
Tabulka 9: Vstupní proudy do OPM při různých úrovních zastínění .....	69
Tabulka 10: Doba náběhu MPPT .....	71

## 13 Seznam grafů

Graf 1: Voltampérová charakteristika, dostupné z: [1] .....	13
Graf 2: V-A Charakteristika za různých teplot, dostupné z: [2] .....	14
Graf 3: V-A Charakteristika pro různé intenzity ozáření, dostupné [2] .....	14
Graf 4: Výkonová charakteristika a) nezastíněná b) s dílčím zastíněním, dostupné z: [3] .....	15
Graf 5: Chování algoritmu, dostupné z: [2] .....	16
Graf 6: Oblasti trackingu pro Buck měnič, dostupné z: [6] .....	18
Graf 7: Voltampérová charakteristika a výkonová charakteristika pro 1 modul ..	53
Graf 8: Voltampérová charakteristika a výkonová charakteristika pro string 5 modulů .....	53
Graf 9: Voltampérová charakteristika a výkonová charakteristika pro string 6 modulů .....	53
Graf 10: Průběh napětí SolarEdge plná optimalizace .....	58
Graf 11: Průběh proudu SolarEdge plná optimalizace .....	58
Graf 12: Průběh výkonů SolarEdge plná optimalizace .....	58
Graf 13: Průběh napětí Huawei plná optimalizace .....	60
Graf 14: Průběh proudu Huawei plná optimalizace .....	60
Graf 15: Průběh výkonů Huawei plná optimalizace .....	60
Graf 16: Průběh napětí Tigo plná optimalizace .....	62
Graf 17: Průběh proudu Tigo plná optimalizace .....	62
Graf 18: Průběh výkonů Tigo plná optimalizace .....	62
Graf 19: Průběh výkonů na DC a AC straně střídače bez optimizérů .....	63
Graf 20: Průběh napětí Tigo při částečné optimalizaci .....	64
Graf 21: Průběh napětí Huawei při částečné optimalizaci .....	64
Graf 22: Průběh proudu Tigo při částečné optimalizaci .....	65
Graf 23: Průběh proudu Huawei při částečné optimalizaci .....	65
Graf 24: Porovnání výkonu při částečné optimalizaci a bez OPM .....	65
Graf 25: Porovnání rychlosti Rapid Shutdown .....	66
Graf 26: Porovnání výkonů optimizérů .....	67
Graf 27: Porovnání výkonů na vstupu a výstupu střídače .....	68
Graf 28: Porovnání účinnosti optimizérů v závislosti na vstupním proudu .....	69
Graf 29: Porovnání absolutních ztrát v závislosti na vstupním proudu .....	70

Graf 30: Porovnání ztrát na optimizérech v procentech.....	70
Graf 31: Porovnání průběhů výkonů na střídači .....	71