



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

TVORBA MODELU SYSTÉMU FVE – ELEKTRICKÝ OHŘEV UŽITKOVÉ VODY

THE DEVELOPMENT OF THE MODEL OF PV SYSTEM FOR ELECTRIC WATER HEATING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tomáš Sochor

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michal Ptáček, Ph.D.

BRNO 2017

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

Student: Tomáš Sochor

ID: 174396

Ročník: 3

Akademický rok: 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Tvorba modelu systému FVE – elektrický ohřev užitkové vody

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Provedení rešerše technických koncepcí systémů využívající FVE pro ohřev užitkové vody
2. Výběr konkrétní koncepce provedení systému a její bližší technický popis
3. Seznámení se s funkčními principy jednotlivých komponent použitých v systému
4. Specifikace vstupních parametrů systému a konkretizace zjednodušujících předpokladů
5. Návrh modelu systému v PSCAD představující střešní FVE určenou pro ohřev užitkové vody
6. Provedení základních ověřovacích simulací, návrh korekcí a demonstrace výsledků vybraných provozních scénářů.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Je vhodné využít technických norem, odborných článků databází IEEE, Web of Science, SCOPUS a jiné. Další literatura je stanovena dle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 6.2.2017

Termín odevzdání: 5.6.2017

Vedoucí práce: Ing. Michal Ptáček, Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Bibliografická citace práce:

SOCHOR, T. *Tvorba modelu systému FVE – elektrický ohřev užitkové vody*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 41 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Michal Ptáček, Ph.D..

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Michalu Ptáčkovi Ph.D. za cenné rady, vstřícnost a ochotu při zpracování mé bakalářské práce.

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma *Tvorba modelu systému FVE – elektrický ohřev užitkové vody* jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.“

V Brně dne: 29.05.2017

.....

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá návrhem modelu fotovoltaické elektrárny pro ohřev užitkové vody v programu PSCAD. V teoretické části práce je proveden rozbor zapojení fotovoltaických systémů vzhledem k distribuční soustavě. Poté je proveden popis vybraných konceptů systému pro ohřev užitkové vody. Následně je matematicky popsán fotovoltaický článek a vliv různých parametrů na jeho zatěžovací charakteristiku. Také jsou popsány základní topologie DC-DC měničů. S těmito měniči souvisí i jejich řízení, a proto jsou popsány základní algoritmy MPPT. Praktická část se zabývá návrhem vybraných konceptů systémů pro ohřev užitkové vody v programu PSCAD. Jsou také provedeny základní simulace chování těchto systémů, zvláště pak závislost na intenzitě slunečního záření a teplotě panelů. Simulace jsou v závěru zhodnoceny.

KLÍČOVÁ SLOVA: Fotovoltaický článek; MPPT; Užitková voda; PSCAD, Fotovoltaický ohřev vody, ohřev vody

ABSTRACT

This thesis deals with designing of a model of a photovoltaic system for domestic water heating in program PSCAD. In theoretical part, an analysis of photovoltaic systems regarding their connection to electrical grid is made. Then a description of chosen concepts of photovoltaic systems for domestic water heating is made. Furthermore, a photovoltaic cell is described with regard to its mathematical description and influence of different parameters on its volt-ampere characteristics. Also, a common topologies of DC-DC converters are described. Control is also related to these converters, that is why a fundamental MPPT algorithms are described. Practical part deals with designing of chosen concepts of photovoltaic systems for domestic water heating in program PSCAD. A basic simulations with regard to behavior of these systems are performed, especially a relationship with respect to irradiance and temperature. Simulations are then discussed in the conclusion.

KEY WORDS: Photovoltaic cell; MPPT; domestic hot water; PSCAD; Photovoltaic water heating; water heating

Obsah

Seznam obrázků	3
Seznam symbolů a zkratk	4
1 Úvod.....	12
2 Možnosti zapojení FV systémů	13
2.1 Grid-on systémy.....	13
2.2 Hybridní systémy	13
2.3 Grid-off systémy	14
2.4 Výhody a nevýhody připojení k DS	15
2.5 Nová zelená úsporám.....	15
3 Vybrané koncepce a jejich popis	16
3.1 Připojení přímo k topnému tělesu.....	16
3.2 Zapojení s technologií MPPT	16
3.3 Zapojení s akumulací energie	16
4 Základní popis komponentů systémů.....	17
4.1 Fotovoltaický článek.....	17
4.1.1 VA charakteristika FV článku	18
4.1.2 Vliv různých parametrů na zatěžovací charakteristiku	18
4.2 Nejčastěji komerčně prodávané typy FV panelů	19
4.2.1 Monokrystalické.....	19
4.2.2 Multikrystalické (polykrystalické)	20
4.2.3 Tenkovrstvé	20
4.3 DC-DC měniče	20
4.3.1 Snižující (buck) měnič.....	20
4.3.2 Zvyšující (boost) měnič.....	21
4.3.3 Invertující (buck-boost) měnič	22
4.3.4 SEPIC	22
4.3.5 Cuk	23
4.4 MPPT a algoritmy.....	23
4.4.1 Přepínání zátěže.....	23
4.4.2 Algoritmy	23
4.4.3 Konstantní napětí.....	23
4.4.4 Metoda proudu nakrátko a napětí naprázdno	23
4.4.5 Perturb and observe (odchýlení a vyhodnocení)	24
4.4.6 Incremental conductance	24
4.5 Regulátory nabíjení baterie.....	24
5 Specifikace vstupních parametrů	26
6 Návrh modelu FVE pro ohřev vody	27
6.1 Připojení přímo k topnému tělesu.....	27
6.2 Zapojení s technologií MPPT	27
6.3 Zapojení s akumulací energie	28
7 Provedení základních simulací	30
7.1 Model přímého připojení topné spirály k FVE.....	30

7.2	Model FV systému s technologií MPPT.....	34
7.3	Model FV systému s akumulací energie.....	36
8	Závěr	38
	Seznam použité literatury	39
9	Přílohy	41

Seznam obrázků

Obr. 2.1 Schéma hybridního systému s ukládáním přebytků energie do bojleru [2]	13
Obr. 2.2 Schéma ohřevu vody systémem Solar Kerberos	14
Obr. 4.1 Náhradní schéma fotovoltaického článku [4]	17
Obr. 4.2 Náhradní schéma fotovoltaického panelu [4]	17
Obr. 4.3 Voltampérová a výkonová charakteristika FV článku [1]	18
Obr. 4.4 Zapojení snižujícího DC-DC měniče [8]	20
Obr. 4.5 Zapojení zvyšujícího DC-DC měniče [8]	21
Obr. 4.6 Zapojení Invertujícího DC-DC měniče [8]	22
Obr. 7.1 Model přímého připojení topné spirály	30
Obr. 7.2 Zatěžovací charakteristika zvoleného FV panelu	30
Obr. 7.3 Výkonová charakteristika zvoleného FV panelu	31
Obr. 7.4 Zátěžová charakteristika při částečném stínění panelů bez použití obtokové diody.....	31
Obr. 7.5 Zatěžovací charakteristika při částečném zastínění panelů s použitím obtokové diody	32
Obr. 7.6 Průběh napětí FV panelů (nahore), proudu dodávaný FV panely (veprostřed) a dodávaný výkon (dole) při změně teploty	33
Obr. 7.7 Průběh napětí FV panelů (nahore), proudu dodávaný FV panely (veprostřed) a dodávaný výkon (dole) při změně intenzity slunečního záření	33
Obr. 7.8 Model zapojení s technologií MPPT	34
Obr. 7.9 Dodávaný výkon FV panely při různých hodnotách intenzity záření (nahore), napětí na FV panelech v průběhu změny intenzity záření (ve středu), napětí generované algoritmem MPPT (dole)	34
Obr. 7.10 Procentuální hodnoty dodávaného výkonu přímého zapojení topné spirály vztažené k výkonu dodávaném při zapojení technologie MPPT	36
Obr. 7.11 Model zapojení s akumulací energie.....	36
Obr. 7.12 Regulace napětí baterie	37
Obr. 9.1 Regulace zapojení s technologií MPPT	41
Obr. 9.2 Regulace zapojení s akumulací energie	41

Seznam tabulek

Tab. 6-1 Parametry FV panelu	27
Tab. 6-2 Hodnoty součástí v zapojení MPPT	29
Tab. 6-3 Hodnoty součástí v zapojení s akumulací energie	29
Tab. 7-1 Hodnoty dodávaného výkonu během dne pro přímo připojené topné těleso a zapojení s technologií MPPT.....	35

Seznam symbolů a zkratek

Veličina	Popis	Jednotka
A	Faktor ideálnost	-
AM	Vzduchová hmota	-
C	Kapacita kondenzátoru	F
C_{usm}	Kapacita kondenzátoru usměřovače	F
C_{vst}	Vstupní kondenzátor	F
$C_{výst}$	Výstupní kondenzátor	F
D	Střída	-
FF	Činitel plnění	-
f_s	Spínací frekvence	Hz
I	Výstupní proud fotovoltaického článku	A
I_k	Proud nakrátko	A
I_{max}	Maximální proud	A
I_{mp}	Proud v bodě maximálního výkonu	A
I_{PH}	Generovaný proud fotovoltaického článku	A
I_S	Saturační proud	A
I_{SC}	Proud nakrátko	A
k	Boltzmannova konstanta	J·K ⁻¹
L	Indukčnost cívky	H
L_{buck}	Indukčnost buck měniče	H
L_{boost}	Indukčnost boost měniče	H
N_S	Počet článků zapojených v sérii	-
N_P	Počet článků zapojených paralelně	-
P	Výkon	W
P_{mp}	Výkon v bodě maximálního výkonu	W
P_{in}	Výkon dopadajícího slunečního záření	W
q	Elektrický náboj	C
R	Odpor topného tělesa	Ω
R_S	Sériový odpor	Ω
R_{SH}	Paralelní odpor	Ω
T_P	Teplota	K
T	Perioda	s
U	Výstupní napětí	A
U_{mp}	Napětí v bodě maximálního výkonu	V
U_o	Napětí naprázdno	V
U_{OC}	Napětí naprázdno	V
U_{vst}	Vstupní napětí	V
$U_{výst}$	Výstupní napětí	V
η	Účinnost článku	%
ΔI	Zvlnění výstupního proud	A
ΔI_L	Peak-to-peak hodnota proudu cívkou	A
$\Delta U_{výst}$	Zvlnění výstupního napětí	V

Zkratka	Popis
CCM	Mód nepřerušovaného proudu
DS	Distribuční síť
EU	Evropská unie
FV	Fotovoltaický/á
FVE	Fotovoltaická elektrárna
MPP	Bod maximálního výkonu
MPPT	Sledovač bodu maximálního výkonu
PVGIS	Fotovoltaický geografický informační systém
PWM	Pulsní šířková modulace
SSR	Solid state relé
STC	Standartní testovací podmínky
TUV	Teplá užitková voda
VA	Voltampérová

1 Úvod

Energie byla vždy v různých formách nedílnou součástí života. Od dob průmyslové revoluce je elektrická energie čím dál tím víc požadovaným a již ve velké části světa zcela běžným zdrojem. Důsledkem růstu lidské populace a problémům, jako je například globální oteplování, klesající zásoby a kvalita fosilních paliv, je čím dál tím perspektivnější hledat energetický zdroj energie v obnovitelných zdrojích.

Jedním z těchto zdrojů je sluneční energie. Tuto energii využívá fotovoltaický článek, který přeměňuje sluneční záření na elektrickou energii. První vědec, který svými experimenty pozoroval fotoelektrický jev, byl francouzský fyzik Edmond Becquerel. První fotovoltaický článek byl vyvinut profesorem Adamsem a jeho studentem Dayem roku 1877 a byl vyrobený ze selenu. O další technologický pokrok se zasloužil roku 1883 americký vynálezce Charles Edgar Fritts, jehož fotovoltaický článek měl účinnost kolem 1 %. Zásadní podíl na rozvoji fotovoltaiky měl také Albert Einstein, který fotoelektrický jev pomohl objasnit [1].

Od této doby účinnost fotovoltaických článků značně vzrostla a vzniklo mnoho typů a způsobů výroby článků a následných panelů, které tvoří vzájemné pospojování jednotlivých článků dle potřeby. Články se nejdříve začali používat převážně v kosmonautice, ale jejich použití je v dnešní době daleko širší. Používají se například v kalkulačkách, hodinkách, pro napájení spotřebičů v domech či pro napájení elektrické sítě.

V rámci elektrizační soustavy České republiky a států Evropské Unie (EU) se v blízké budoucnosti očekává nárůst instalací fotovoltaických elektráren (FVE) připojených do hladiny nízkého napětí. Obecně se předpokládá nárůst celkového instalovaného výkonu FVE umístěných na střechách jednotlivých objektů, což má přispět zejména ke zvýšení jejich energetické soběstačnosti. Pro zvýšení energetické soběstačnosti byl v České republice vyhlášen program Nová zelená úsporám, který mimo jiné poskytuje dotace právě na fotovoltaické systémy. Jsou to hlavně systémy pro přípravu teplé užitkové vody a pro systémy s akumulací elektrické energie. Na druhou stranu je dobré mít v povědomí, že zvýšení celkového podílu rozptýlené výroby s sebou pravděpodobně přinese i řadu problému v souvislosti s řízením elektrizační soustavy.

2 Možnosti zapojení FV systémů

V této kapitole budou shrnuty možnosti zapojení jednotlivých fotovoltaických systémů, u kterých bude přihlídnuto i k ohřevu užitkové vody.

Zapojení fotovoltaických systémů lze z hlediska zapojení dělit:

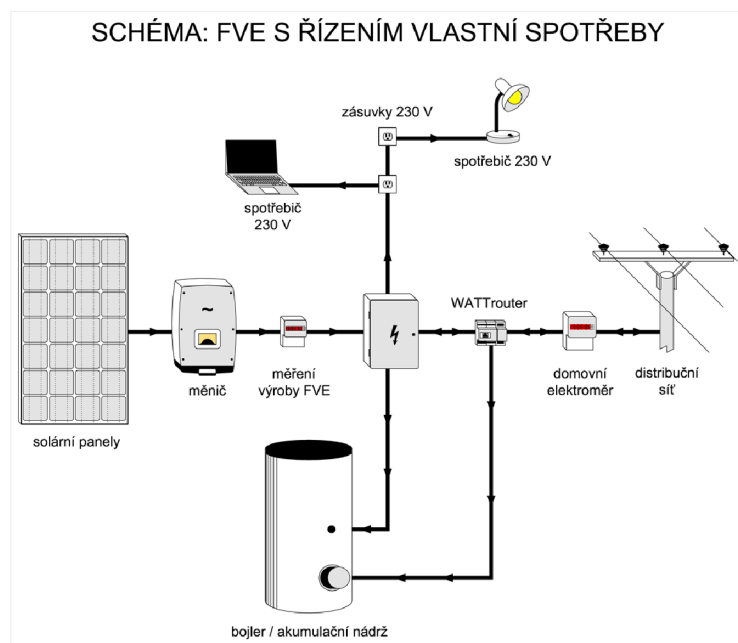
- Systémy spojeny s DS (Grid-on)
- Hybridní systémy
- Autonomní systémy (Grid-off)

2.1 Grid-on systémy

Jak již název vypovídá, tyto systémy jsou spojeny s distribuční sítí. Jelikož napětí generované fotovoltaickými panely je stejnosměrné a distribuční síť pracuje pouze se střídavým napětím, je pro tento způsob zapojení zapotřebí inverter, který mění výstupní stejnosměrné napětí fotovoltaického panelu na napětí střídavé [3]. Tyto systémy jsou vybaveny i dalšími zařízeními jako například elektroměrem a ochranami. Z tohoto důvodu jsou Grid-on systémy většinou složitější než systémy autonomní, zvyšují se tedy i pořizovací náklady. Co se týče domovních zapojení, jsou to systémy většinou větších výkonů (10 kWp a více). Tyto systémy potom buďto veškerou svojí energii posílají do sítě, či část energie spotřebují pro vlastní spotřebu s přebytky dodávanými do sítě. Spotřeba veškeré vyrobené energie je tedy velkou výhodou oproti autonomnímu systému.

2.2 Hybridní systémy

Hybridní systémy jsou kombinací Grid-on a Grid-off systémů. Jsou to vlastně systémy Grid-on, u kterých nesmí dojít k žádným přetokům energie do sítě. K zabránění těchto přetoků slouží WATTrouter. Jelikož běžné spotřebiče jsou napájeny střídavým napětím, a i tento systém je spojen s distribuční sítí, je i v těchto systémech potřeba inverter. Tento systém většinou napájí spotřebiče v domě s tím, že přebytky energie ukládá v akumulátorech, bojleru, či v jiných akumulčních nádobách [2]. Všechna energie se tedy spotřebuje v místě výroby, což je pro vlastníka FV systému i distributora elektrické energie žádoucí. Ilustrační zapojení takového systému je na obr. 2-2.

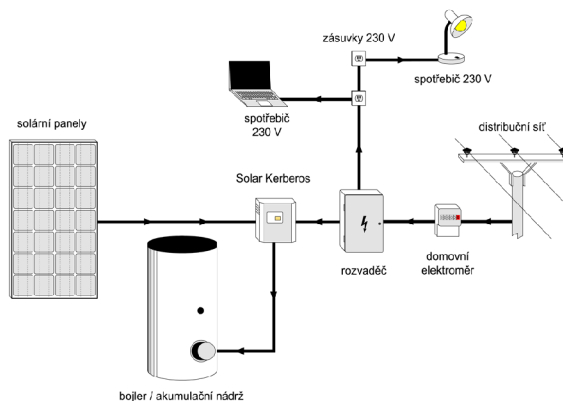


Obr. 2.1 Schéma hybridního systému s ukládáním přebytků energie do bojleru [2]

2.3 Grid-off systémy

Autonomní (Grid-off) systémy nejsou připojeny na Distribuční síť. Používají se hlavně v odlehlých oblastech, kde připojení k DS není možné. Složitost celého systému velice závisí na velikosti počtu a typu spotřebičů, které jsou tímto systémem napájeny. Pomocí autonomního systému se řeší i zapojení pro samostatný ohřev užitkové vody. Ilustrační schéma je zobrazeno na obrázku 2-1.

SCHÉMA: OHŘEV VODY SYSTÉMEM SOLAR KERBEROS



Obr. 2.2 Schéma ohřevu vody systémem Solar Kerberos

Jelikož jsou tyto systémy pro ohřev užitkové vody v dnešní době nejpoužívanější, bude tato bakalářská práce řešit pouze zapojení grid-off systémů. Následně si popíšeme několik řešení ohřevu užitkové vody dostupné na trhu.

Solar Kerberos

Zapojení se zařízením Solar Kerberos lze vidět na obr. 2-1. Zařízení Solar Kerberos přepíná mezi ohřevem pomocí fotovoltaických panelů a ohřevem ze sítě podle osvětlení panelů. Tento způsob vyžaduje pouze jedno topné těleso. Jelikož je výstupní napětí stejnosměrné vzniká při vypnutí termostatu elektrický oblouk. Toto zařízení nahradí termostat pomocí SSR (solid state relé). Díky tomu není nutné vyměňovat topné těleso za speciální určené pro stejnosměrný proud. Různé varianty tohoto zařízení obsahují také možnost připojení druhého topného tělesa, či mají výstup pro nabíjení baterie pro případ přebytků vyrobené energie.

Marko

Toto zařízení je o něco jednodušší než výrobek Solar Kerberos. Toto zařízení není schopno přepínat mezi sítí a fotovoltaickými panely. Pro dodatečný ohřev vody ze sítě je tedy potřeba dalšího topného tělesa nebo je potřeba pořídit dodatečné součástky pro přepínání mezi sítí a panely. Velkou výhodou je ale výstupní napětí, které není stejnosměrné, ale je to tzv. modifikovaný sinus. To znamená že má charakter střídavého průběhu a není teda potřeba dále topné těleso upravovat. Jelikož ale zařízení obsahuje střídač, má oproti zařízení Solar Kerberos menší účinnost.

Logitex (Dražice)

Firma Dražice prodává speciální bojler, který je opatřen jedním tělesem na stejnosměrné napájení z fotovoltaických panelů a druhé, které se připojí do distribuční sítě. Panely jsou zapojeny přes zařízení od firmy Logitex, které obsahuje technologii MPPT (hledání bodu maximálního výkonu). Touto technologií také disponují již zmíněné produkty. Každé topné těleso má svůj

termostat. Termostat zapojený do distribuční sítě je většinou nastaven, aby vypínal při teplotě 40°C. To zaopatřuje zásobu dostatečně teplé vody. Termostat připojený k fotovoltaickým panelům je pak nastaven na hodnotu vyšší podle potřeby.

2.4 Výhody a nevýhody připojení k DS

Z výše popsaných systémů tedy plynou jistá pozitiva a negativa co se týče připojení systému k distribuční síti. V této podkapitole budou tyto pozitiva a negativa shrnuta do bodů s přihlédnutím k ekonomickému a politickému stavu.

Připojení k DS

Klady:

- + Možnost dodávat energii do sítě (neplatí pro mikrodroje do 10 kWp)
- + Zastoupení dodávky energie spotřebičům

Zápory:

- Je potřeba zažádat o připojení systému k DS
- Komplexnost, cena
- Pokuty za přetoky do DS (pouze pro mikrodroje do 10 kWp)
- Povinnost instalace panelů na střechu
- Malé výkupní ceny

2.5 Nová zelená úsporám

Program Nová zelená úsporám je program ministerstva životního prostředí, který cílí za pomoci dotací zvětšit úsporu energie v budovách pro bydlení. Hlavním cílem je zlepšení stavu životního prostředí snížením produkce skleníkových plynů, zvýšením podílu obnovitelných zdrojů energie a stimulace české ekonomiky. Základní podmínky pro obdržení dotací pro přímý ohřev vody pomocí fotovoltaických panelů udává podoblast C.3.3 [10].

Podmínky:

- Instalovaný fotovoltaický systém musí být vybaven technologií pro impedanční přizpůsobení zátěže (MPPT)
- Minimální účinnost monokrystalických a polykrystalických panelů musí být 15 %
- Minimální účinnost tenkovrstvých panelů musí být 10 %
- Systém nesmí být propojen s distribuční sítí
- Systém musí být umístěn na stavbě evidované v katastru nemovitostí, popř. jiné stávající stavbě umístěné na pozemku
- Minimální pokrytí tepla na přípravu teplé vody 50 %
- Minimální měrný objem akumulčního zásobníku tepla vztažený k instalovanému výkonu solárního systému $\geq 80 \text{ l} \cdot \text{kWp}^{-1}$

3 Vybrané koncepce a jejich popis

V minulé kapitole bylo provedena rešerše zapojení systému vzhledem k distribuční síti. V této kapitole bude proveden popis vybraných konceptů systémů grid-off pro ohřev vody. Byli zvoleny tři způsoby zapojení fotovoltaického systému pro ohřev užitkové vody.

3.1 Připojení přímo k topnému tělesu

Tato koncepce představuje zapojení, kdy je topné těleso přímo spojeno s fotovoltaickými panely. V dnešní době se takové zapojení provádí jen zřídka. Mnoho ale starších zapojení jsou takto provedena. Problém je hlavně s impedančním přizpůsobením topné spirály. Jak se během dne mění intenzita slunečního záření a teplota, mění se i pracovní bod fotovoltaického panelu. Proto je u takového systému velice důležité znát klimatické podmínky. Pokud je známe, jsme schopni zvolit příslušný výkon topného tělesa abychom dostali ze systému co nejvíce energie.

3.2 Zapojení s technologií MPPT

Toto zapojení se oproti přímému zapojení k topnému tělesu liší tím, že mezi topné těleso a fotovoltaické panely zapojí DC-DC měnič s technologií MPPT. Tato technologie pomocí PWM (pulsně šířkové modulace) mění střidu měniče a tím mění i impedanci zátěže. Při změnách slunečního záření tedy měnič posouvá pracovní bod, aby se systém nacházel vždy v bodě maximálního výkonu. Tím je zaručeno zvýšení dodávky energie do topného tělesa. Takto je provedeno v dnešní době většina zapojení pro ohřev užitkové vody.

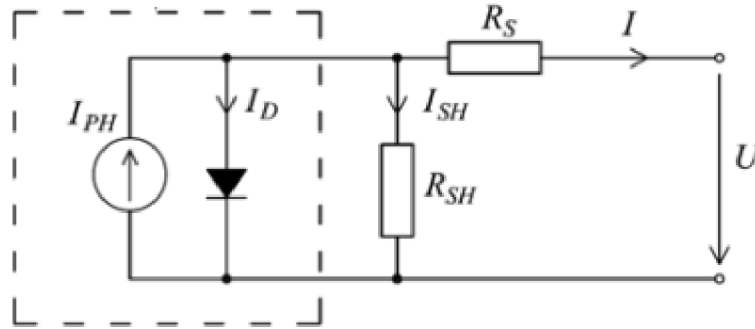
3.3 Zapojení s akumulací energie

koncept vychází z obecného zapojení fotovoltaického systému s akumulací energie bez bližší specifikace zátěže [11]. Toto zapojení je uzpůsobeno tak, aby fotovoltaické panely spolupracovali s distribuční sítí. Fotovoltaické panely přebytky ukládají do akumulátoru a pokud panely neprodukují dost energie a akumulátor je vybit, přepne se topné těleso na distribuční síť. Toto zapojení je z hlediska spolehlivosti velice stabilní. V praxi se toto zapojení přímo pro ohřev užitkové vody sice nevyskytuje, poskytuje nám ale náhled na to, jak by se takový systém řídil. Zvláště pak z hlediska regulace nabíjení a vybíjení akumulátoru.

4 Základní popis komponentů systémů

4.1 Fotovoltaický článek

Pokud chceme navrhnout matematický model FV systému, musíme nejdřív umět matematicky popsat samotný fotovoltaický článek. FV článek můžeme nahradit následujícím schématem.



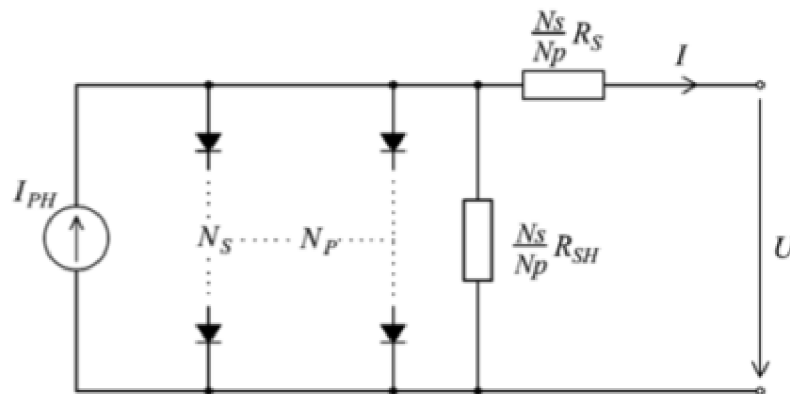
Obr. 4.1 Náhradní schéma fotovoltaického článku [4]

Ohraničená čárkovaná oblast značí ideální FV článek bez parazitních odporů. Na základě tohoto schématu lze odvodit vztah pro výstupní proud článku, který je dán rovnicí

$$I = I_{PH} - I_S \left(\exp \left[\frac{q(U + IR_S)}{KT_P A} \right] - 1 \right) - \frac{(U - IR_S)}{R_{SH}} \quad (1)$$

Kde I je výstupní proud (A), I_{PH} je generovaný proud (A), I_S je saturační proud (A), q je elektrický náboj (C), K je Boltzmannova konstanta ($J \cdot K^{-1}$), A je faktor ideálnosti (-), U je výstupní napětí (V), T_P je teplota (K), R_S je sériový odpor (Ω) a R_{SH} je paralelní odpor (Ω).

Jelikož ale jeden článek nestačí na výrobu dostatečného výkonu, spojují se články do panelů. Fotovoltaický panel lze nahradit následujícím schématem.

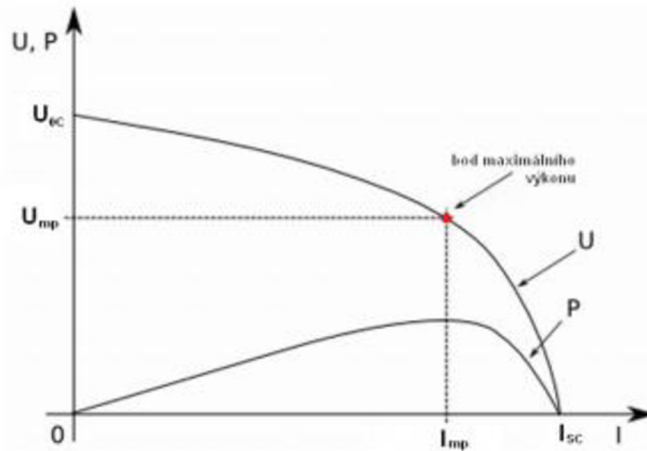


Obr. 4.2 Náhradní schéma fotovoltaického panelu [4]

N_S značí počet článků zapojených v sérii (-) a N_P počet článků zapojených paralelně (-). Jak lze ze schématu pozorovat celkový paralelní odpor R_{SH} a sériový odpor R_S je roven násobku poměru mezi počtem článků zapojených v sérii N_S a počtem článků zapojených paralelně N_P [4].

4.1.1 VA charakteristika FV článku

Nejdůležitějším údajem o chování FV článku je jeho charakteristika. Typická charakteristika fotovoltaického článku je zobrazena na následujícím obrázku.



Obr. 4.3 Voltampérová a výkonová charakteristika FV článku [1]

Jak lze vidět z obrázku, voltampérová charakteristika FV článku je značně nelineární. Na charakteristice jsou také vidět důležité parametry článků, které charakterizují daný článek. Je to napětí naprázdno U_{OC} , Proud nakrátko I_{sc} , proud v bodě maximálního výkonu I_{mp} a napětí v bodě maximálního výkonu U_{mp} .

Další parametr, který se udává, je výkon fotovoltaického článku. Ten je definován jako

$$P = U_{mp} \cdot I_{mp} \quad (2)$$

Kde P je výkon (W), U_{mp} je napětí v bodě maximálního výkonu (V), I_{mp} je proud v bodě maximálního výkonu (A).

Významnými parametry jsou také činitel plnění FF (Fill factor) a účinnost článku η . Pro činitel plnění lze napsat

$$FF = \frac{U_{mp} \cdot I_{mp}}{U_{OC} \cdot I_{SC}} \quad (3)$$

Činitel plnění udává, jak se charakteristika přibližuje ideální čtvercové charakteristice ohraničené napětím naprázdno a proudem nakrátko. Pro účinnost (η) lze psát

$$\eta = \frac{U_{mp} \cdot I_{mp}}{P_{in}} \quad (4)$$

Kde P_{in} je výkon dopadajícího slunečního záření (W).

Všechny tyto hodnoty se měří za standardních testovacích podmínek, tj. při teplotě $T = 25$ °C, intenzitě slunečního záření $I = 1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ a vzduchové hmotě $AM = 1,5$ [1].

4.1.2 Vliv různých parametrů na zatěžovací charakteristiku

Jelikož zatěžovací charakteristika je poměrně závislá na vlivu počasí, je potřeba si udělat představu o tom, jak se charakteristika bude měnit při změnách teploty, intenzity slunečního záření a částečné či úplné stínění FV panelů.

Závislost na teplotě

Jak jsme si již uvedli, parametry udávané na fotovoltaickém panelu jsou naměřeny za standardních podmínek, kde jednou z podmínek je teplota 25 °C. Je ale zřejmé, že za normálních okolností je teplota okolí jiná. V létě, kdy teplota okolí stoupá, může snadno povrchová teplota panelu přesáhnout 50 °C. Se vzrůstající teplotou roste i počet minoritních nosičů a tím roste i proud nakrátko. Tento růst je ale zanedbatelný oproti poklesu napětí naprázdno. Napětí naprázdno se vzrůstající teplotou klesá lineárně a pro křemík o teplotě 300 K odpovídá pokles napětí zhruba -2.3 mV/°C [5]. Výkon tedy se snižující teplotou klesá.

Závislost na intenzitě slunečního záření

Jelikož fotovoltaický článek přeměňuje energii slunečního záření na energii elektrickou, je správné předpokládat závislost zatěžovací charakteristiky článku na intenzitě záření. Stejně jako teplota měla velký vliv na napětí naprázdno a malý vliv na proud nakrátko, intenzita slunečního záření má efekt opačný. Při zvýšení intenzity lze pozorovat značné zvýšení proudu nakrátko a malé zvýšení napětí naprázdno. Změna intenzity téměř odpovídá změně proudu, tedy pokud intenzita vzroste dvojnásobně, vzroste dvojnásobně i proud [6].

Závislost stínění

Ve většině panelů je za sebou sériově pospojováno několik samostatných fotovoltaických článků. Pro tento celek pak platí, že generovaný proud je roven proudu generovaným nejméně osvětleným článkem. Pokud tedy zakryjeme jeden z celé řady sériově pospojovaných článků, celek nebude generovat žádný proud. Tento problém je řešen bypass diodami, které přemostují jednotlivé zastíněné články, aby kolem nich mohl protéct proud. Tím ale vzniká na charakteristice více bodů maximálního výkonu, které způsobují další problémy, zvláště pak pro algoritmy hledající tento bod (MPPT).

Závislost na parazitních odporech

Jak lze vidět z obr. 3-1, fotovoltaický článek má dva parazitní odpory. Je to sériový odpor R_s , který představuje ztráty na kontaktech a paralelní odpor R_{SH} , který představuje vnitřní ztráty. Hodnota těchto odporů je dána výrobními procesy. Vliv těchto odporů na zatěžovou charakteristiku není předmětem této práce, je ale vhodné si uvědomit, že postupnou degradací článku se zvyšuje zvláště sériový odpor R_s , který způsobuje linearizaci charakteristiky.

4.2 Nejčastěji komerčně prodávané typy FV panelů

V této podkapitole si vypíšeme základní výhody a vlastnosti nejčastěji prodávaných typů FV panelů.

4.2.1 Monokrystalické

Tyto fotovoltaické články jsou vyrobeny promícháním ignotů křemíků, dokud nevznikne homogenní krystalická struktura. Z hlediska účinnosti článku třech komerčně nejprodávanějších typů jsou nejučinnější. Účinnosti těchto článků se pohybují kolem 17 %. Články od společnosti Sunpower, dosahují v současnosti dokonce účinnosti 24 %. Jelikož jsou vyrobené články kruhovitěho tvaru, které se pak řežou do požadovaných rozměrů, poznáme je většinou tak, že mají oblé, oříznuté rohy a jednolitý povrch tmavšího odstínu. Jejich výkon významně klesá se stíněním, či změnou sklonu panelu [6].

4.2.2 Multikrystalické (polykrystalické)

Multikrystalické články jsou vyrobeny z několika křemíkových krystalických zrn, jejich povrch je tedy nehomogenní. Jelikož čistota křemíku není tak vysoká jako u monokrystalického panelu a zrna jsou náhodně uspořádána, jsou tyto články méně účinné [6]. Jejich účinnost se pohybuje kolem 15 %. Poznáme je podle čtvercovitého tvaru s ostrými rohy, nehomogenity povrchu a světlejšího odstínu. Vzhledem k neuspořádanosti zrn, jsou méně náchylné na stínění a změnu sklonu na rozdíl od monokrystalického článku.

4.2.3 Tenkovrstvé

Tenkovrstvé články se vyrábějí nejčastěji z amorfního křemíku, či ze sloučeniny Cadmia a Telluridu. Jelikož hlavním účelem těchto článků je omezit spotřebu materiálu, trpí tím zároveň účinnost panelu. Účinnost těchto panelů se pohybuje kolem 10 %. Protože se tyto články mohou napařovat do fólií, jsou ohebné a dají se tedy přizpůsobit různým povrchům. Tenkovrstvé články jsou také nařezávány na tenké pásy, které se pak pomocí obtokových diod vzájemně spojují a tvoří tak panel. Tím vznikají menší náchylnosti k poklesu výkonu při účincích stínění oproti krystalickým panelům [6].

4.3 DC-DC měniče

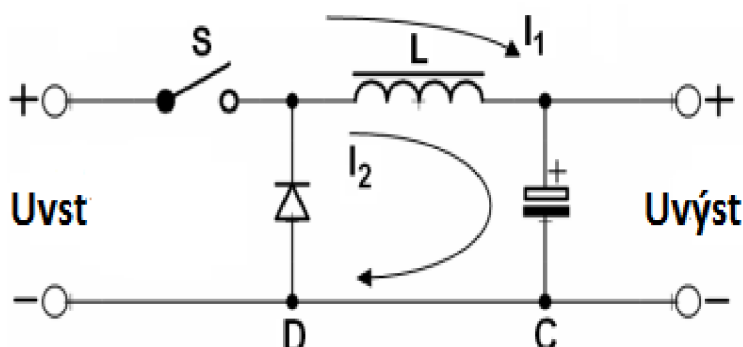
DC-DC měniče slouží k přeměně vstupního stejnosměrného napětí na stejnosměrné výstupní napětí o jiné hodnotě. Požadovaných výstupním parametrem může být také proud. Tyto měniče mají uplatnění v širokém spektru zařízení. Uplatňují se například v noteboocích, řízení stejnosměrných motorů, telekomunikaci či napájecích systémech vesmírných zařízení [7].

Základní zapojení měničů

DC-DC měnič je i nedílnou součástí většiny fotovoltaických systémů, a proto považují za vhodné uvést alespoň nejzákladnější topologie těchto měničů.

4.3.1 Snižující (buck) měnič

Jedno ze základních topologií je snižující (buck) měnič. Tento měnič má na svém výstupu vždy menší hodnotu napětí než na vstupu. Principiální schéma je na následujícím obrázku.



Obr. 4.4 Zapojení snižujícího DC-DC měniče [8]

Při zapnutí spínače S, který je většinou realizován tranzistorem MOSFET či IGBT, se přes cívku L nabije proudem I_1 kondenzátor C. Proud cívku tedy poroste. Po rozeptnutí spínače se indukčnost snaží udržet směr a velikost proudu. Proud cívku (nyní I_2), se tedy uzavírá přes diodu

D. Proud bude následně klesat, protože cívka ztrácí svoji naakumulovanou energii. Střídou spínání tedy můžeme regulovat výstupní napětí [8]. Chování měniče pak můžeme popsat následujícími rovnicemi [14]

$$(U_{vst} - U_{výst})DT = U_{výst}(1 - D)T \quad (5)$$

Kde U_{vst} je vstupní napětí (V), $U_{výst}$ je výstupní napětí (V), D je střída (-) a T je perioda (s). Pro zvlnění proudu cívku potom platí [14]

$$\Delta I_L = \frac{(1 - D)T}{L} U_{výst} \quad (6)$$

Kde ΔI_L je peak-to-peak hodnota proudu cívku (A) a L je indukčnost cívky (H). Následně odvodíme střidu [13]

$$D = \frac{U_{výst}}{U_{vst}} \quad (7)$$

Pro indukčnost potom můžeme napsat [13]

$$L = \frac{U_{výst} \cdot (U_{vst} - U_{výst})}{\Delta I \cdot f_s \cdot U_{vst}} \quad (8)$$

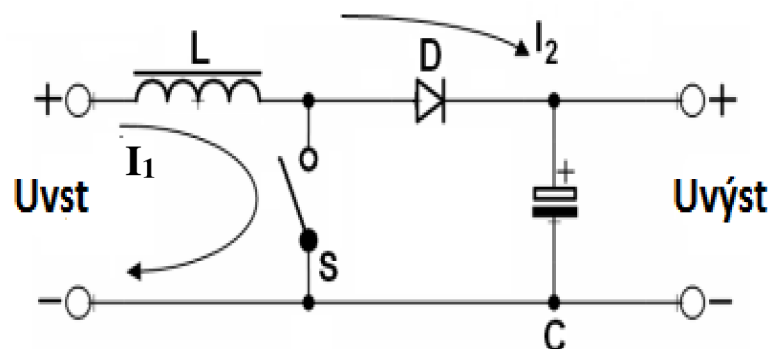
Kde f_s je spínací frekvence (Hz). Pro kapacitu platí [13]

$$C = \frac{\Delta I}{8 \cdot f_s \cdot \Delta U_{výst}} \quad (9)$$

Kde $\Delta U_{výst}$ je zvlnění výstupního napětí (V) a C je kapacita kondenzátor (F).

4.3.2 Zvyšující (boost) měnič

Další topologií je takzvaný zvyšující měnič. Tento měnič má na výstupu větší napětí než na vstupu. Principiální zapojení je na následném obrázku.



Obr. 4.5 Zapojení zvyšujícího DC-DC měniče [8]

Pokud je spínač S rozepnut, kondenzátor C je ze zdroje přes cívku L nabíjen proudem I_2 . Po sepnutí spínače se proud cívku bude uzavírat přes spínač (I_1) a proud cívku poroste. Dioda D slouží k zabránění vybíjení kondenzátoru přes spínač. Po opětovném rozepnutí si cívka snaží proud udržet. Tento proud začne znovu nabíjet kondenzátor a dojde tak ke zvýšení výstupního napětí oproti vstupnímu [8]. Pro tento měnič tedy můžeme napsat [14]

$$\frac{U_{výst}}{U_{vst}} = \frac{1}{1-D} \quad (10)$$

Pro zvlnění proudu poté můžeme napsat [14]

$$\Delta I_L = \frac{U_{vst} \cdot D \cdot T}{L} \quad (11)$$

Následně odvodíme střidu [12]

$$D = 1 - \frac{U_{in}}{U_{out}} \quad (12)$$

Z těchto vzorců následnými úpravami vypočteme parametry. Pro indukčnost lze napsat [12]

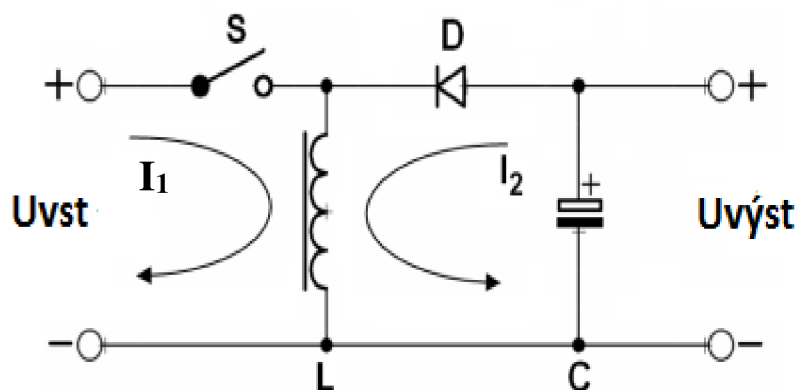
$$L = \frac{U_{vst} \cdot (U_{výst} - U_{vst})}{\Delta I \cdot f_S \cdot U_{výst}} \quad (13)$$

Pro kapacitu potom platí [12]

$$C = \frac{I_{výst} \cdot D}{f_S \cdot \Delta U_{výst}} \quad (14)$$

4.3.3 Invertující (buck-boost) měnič

Invertující měnič je zajímavý tím, že na výstupu může mít vyšší nebo nižší hodnotu napětí, než je na vstupu. Tento měnič se nazývá invertující, jelikož je na výstupu obrácená polarita napětí oproti vstupu. Principiální zapojení lze vidět na následujícím obrázku.



Obr. 4.6 Zapojení Invertujícího DC-DC měniče [8]

Při sepnutí spínače S začne cívkou L téct proud I_1 . Po rozepnutí spínače, se cívka snaží udržet proud a začne se vybíjet přes kapacitor C. Proud tedy bude klesat a napětí na kondenzátoru stoupat. Kondenzátor se nabije na opačnou polaritu oproti vstupu. Dioda D slouží k zabránění vybíjení kondenzátoru přes cívku L. Střídou spínání lze ovlivnit, jestli bude hodnota výstupního napětí menší, stejná nebo větší, než hodnota vstupního napětí [8].

4.3.4 SEPIC

Stejně jako u invertujícího měniče, může být na výstupu vyšší nebo nižší hodnota napětí než na vstupu. Veliká výhoda tohoto měniče oproti invertujícímu je, že neobrací polaritu napětí na

výstupu. Oproti invertujícímu zapojení má také lepší účinnost, nemá přerušovaný vstupní proud a nemá tak velké zvlnění proudu a napětí.

4.3.5 Cuk

Stejně jako u invertujícího měniče, může být na výstupu vyšší nebo nižší hodnota napětí než na vstupu. Polarita výstupního napětí je také obrácena. Stejně jako SEPIC má oproti invertujícímu zapojení také lepší účinnost, nemá přerušovaný vstupní proud a nemá tak velké zvlnění proudu a napětí.

4.4 MPPT a algoritmy

Impedanční přizpůsobení se v praxi provádí dvěma způsoby. První způsob je přepínat zapojovat v různých kombinacích topná tělesa, čímž se tedy mění odpor zátěže. Tento způsob se v dnešní době již skoro nepoužívá. Druhý způsob je použití DC-DC měniče, kdy pomocí střídavého měniče měníme odpor zátěže.

4.4.1 Přepínání zátěže

Nejjednodušší způsob, jak docílit impedančního přizpůsobení, je přepínání zátěže v průběhu dne. Jelikož pracovní bod zátěžové charakteristiky FV panelu závisí na odporu, dokážeme pomocí změny odporu zátěže tento pracovní bod měnit. V ideálním případě bychom měli proměnný rezistor, jehož hodnotu odporu bychom podle intenzity slunečního záření kontinuálně měnili abychom v každém okamžiku docílili dosažení bodu maximálního výkonu. V praxi ale nemůžeme plynule odpor topné spirály měnit. Proto se zapojí několik topných těles paralelně a pomocí relé se zapojuje taková kombinace, aby výsledný odpor měl hodnotu přibližně odpovídající hodnotě zátěže, při kterém FV panel dodává největší možný výkon. I když je tato metoda méně přesná než přizpůsobení impedance zátěže pomocí DC-DC měniče, zařízení na přepínání topných spirál je vzhledem k jednoduchosti daleko více ekonomicky přijatelnější.

4.4.2 Algoritmy

Nedílnou součástí fotovoltaických systémů jsou také algoritmy, které vyhledávají bod maximálního výkonu (MPP). Bod na zatěžovací charakteristice je dán velikostí zátěže a tak potřebujeme algoritmy, které umí tento bod maximálního výkonu najít. Pokud tento bod známe, můžeme impedanci zátěže přizpůsobit tak, abychom z panelu odebírali co největší možný výkon. Následně jsou tedy základní algoritmy pro hledání maximálního výkonu níže uvedeny.

4.4.3 Konstantní napětí

Tato metoda je nejjednodušší metodou sledování maximálního bodu výkonu. Z již předem změřené VA charakteristiky se odečte, při jakém napětí je bod maximálního výkonu. Toto napětí se nastaví jako referenční a udržuje se na této hodnotě. Tato metoda je velice neúčinná zvláště při změnách teploty panelu.

4.4.4 Metoda proudu nakrátko a napětí naprázdno

Tyto dvě metody vycházejí ze skutečnosti, že vztah mezi napětím v maximálním bodu výkonu a napětím naprázdno je lineární. Taktéž vztah mezi proudem nakrátko a proudem v maximálním bodě výkonu je dán lineární závislostí. Při změně podmínek se tedy panel musí na chvíli zkratovat či rozpojit, protože je potřeba při nových podmínkách změřit napětí naprázdno či proud nakrátko a přes koeficient vypočítat nový bod maximálního výkonu. Tato metoda je značně nepřesná, a navíc vyžaduje zásah do obvodu za provozu. Proto se někdy využívá samostatného

článku, u kterého se předpokládá stejná charakteristika jako na ostatních zapojených člancích. Tento samostatný článek slouží pouze k měření nového bodu maximálního výkonu [9].

4.4.5 Perturb and observe (odchýlení a vyhodnocení)

Tato metoda využívá závislosti mezi zatěžovací a výkonovou charakteristikou FV článku. U této metody už je nutné měřit výkon a napětí, popřípadě proud. Z výkonové charakteristiky vyplývá, že pokud přírůstek výkonu je kladný a přírůstek napětí je také kladný, MPP se nachází napravo od aktuální hodnoty napětí a algoritmus vyhodnotí, že je třeba napětí zvýšit. Pokud výkonový přírůstek je záporný a napěťový kladný, algoritmus vyhodnotí, že MPP se nachází vlevo a napětí zase sníží. V MPP je přírůstek roven nule. Tato metoda tedy osciluje kolem MPP, jelikož se podmínky pořád mění. Metoda je také náchylná na náhlé změny ozáření, a může zvolit špatný směr [9].

4.4.6 Incremental conductance

Tato metoda je rozepsanější metodou Perturb and observe. Protože výkon lze napsat jako násobek napětí a proudu ($U \cdot I$), lze derivaci výkonu podle napětí v bodě maximálního výkonu rozepsat jako

$$\frac{dP}{dU} \cong \frac{\Delta P}{\Delta U} = \frac{d(U \cdot I)}{dU} = I + \frac{U \cdot \Delta I}{\Delta U} = 0 \quad (15)$$

$$\frac{\Delta I}{\Delta U} = -\frac{I}{U} \quad (16)$$

Pokud se nacházíme vpravo od MPP tak platí

$$\frac{\Delta I}{\Delta U} < -\frac{I}{U} \quad (17)$$

A pokud vlevo tak platí

$$\frac{\Delta I}{\Delta U} > -\frac{I}{U} \quad (18)$$

Z tohoto vztahu je tedy zřejmé, že pokud změna proudu na změně napětí bude větší, než je aktuální záporná hodnota podílu mezi proudem a napětím, MPP se tedy nachází vpravo a je potřeba napětí zvýšit. Tato metoda dosahuje větší účinnosti jako Perturb and observe metoda, avšak její nedostatky jsou podobné [9].

4.5 Regulátory nabíjení baterie

Pokud budeme mít fotovoltaický systém, kde se nachází akumulátor, musíme zajistit správné řízení nabíjení a vybíjení tohoto akumulátoru. K tomu slouží právě regulátor nabíjení akumulátoru. Regulátor zajišťuje hlavně tyto úkony:

- Zabránění přebytu baterie
- Zabránění přílišné vybití baterie
- Zajištění připojení/odpojení zátěže

Přebytí baterie

Jednou z hlavních úkolů regulátorů nabíjení je ochrana proti přebytí baterie. Každá baterie má udanou hodnotu nominálního napětí, kterou by měla baterie při plném nabití mít. Pokud tuto hodnotu překročíme, riskujeme snížení provozních parametrů baterie, či její zničení. Aby nedošlo k přebytí baterie, regulátor odpojí baterii od fotovoltaických panelů, nebo sníží proud které panely do baterie dodávají. V prvním případě je regulace provedena tak, že při určité hodnotě napětí regulátor odpojí fotovoltaické panely od baterie a při jistém poklesu napětí je znova připojí. V druhém případě je pomocí PWM DC-DC měniče hodnota napětí baterie na danou hodnotu regulována.

Přílišné vybití baterie

Pokud je příliš dlouho nepříznivé podnebí a FVE nedokáže dodat dostatečné množství energie, může nastat případ kdy se baterie příliš vybijí. To má za následek zkrácení doby života baterie a zmenšení kapacity. Určité spotřebiče také mají minimální provozní napětí, a pokud se baterie příliš vybijí, může to způsobit nestabilitu provozu. Proto regulátory při určitém napětí baterie odpojí zátěž.

Omezení proudu

Většina regulátorů mají také ochranu proti přetížení elektrickým proudem. Při určité mezní hodnotě elektrického proudu regulátor obvod rozpojí, nebo tuto hodnotu proudu limituje. Tato limitace proudu je důležitá, aby nedošlo k poškození prvků v obvodu, či k poškození samotné baterie.

Regulace baterie

Regulace baterie ve fotovoltaických systémech většinou vymezena několika body, které určuje stav baterie. Pro regulaci baterie byli určeny tyto čtyři základní body: [15]

- Bod 1 – Při dosažení maximálního napětí baterie. V tomto bodě regulátor odpojí fotovoltaické panely od baterie
- Bod 2 – Při poklesu napětí na určenou hodnotu regulátor opět připojí fotovoltaické panely k baterii.
- Bod 3 – Pokud napětí baterie klesne na příliš nízkou hodnotu, regulátor odpojí zátěž od baterie.
- Bod 4 – Při nabití baterie na určitou hodnotu regulátor opět zátěž připojí.

5 Specifikace vstupních parametrů

Pro návrh modelu je potřeba si vyjmenovat základní vstupní parametry a zjednodušení, které budeme uvažovat.

FV panely

Parametry fotovoltaického panelu jsou těmi nezákladnějšími vstupními údaji. Zvláště důležité jsou hodnoty v bodě maximálního výkonu. Z těchto hodnot poznáme, jaký je možný dodávaný výkon panelů, jaký dokážeme dodávat proud v jaké hodnotě napětí se systém bude nacházet.

Odpor

Dalším vstupním parametrem je odpor topné spirály. Jelikož odpor topné spirály určuje pracovní bod systému, je nastavení správného odporu velice důležité.

Intenzita

Intenzita slunečního záření je jedním z hlavních vstupních parametrů. Je to právě intenzita slunečního záření, která má největší vliv na výstupní charakteristiku fotovoltaických panelů.

Teplota

Teplota je dalším důležitým vstupním parametrem. Ovlivňuje hlavně napětí fotovoltaických panelů.

Akumulátor

Potřebné jsou také parametry použité akumulátorové baterie. Zvláště je důležité nominální napětí a kapacita akumulátoru.

Při návrhu modelů se také uvažovalo několik zjednodušujících předpokladů:

- Stálý odpor topného tělesa
- Zanedbání ztrát kabelů
- Měniče fungují v režimu CCM (mód nepřerušovaného proudu)
- Zanedbávají se ztráty v měničích
- Zanedbávají se úbytky napětí na diodách usměrňovače

6 Návrh modelu FVE pro ohřev vody

Tato kapitola se zabývá parametrizováním a návrhem vybraných konceptů FVE.

6.1 Připojení přímo k topnému tělesu

U tohoto zapojení je potřeba parametrizovat fotovoltaické panely a odpor topného tělesa. Fotovoltaický panel byl navrhnout tak, aby splňoval požadavky pro zapojení FV systému podle firmy Dražice. Firma požaduje následující hodnoty panelů:

$$U_{mp} = 30 \text{ V} \pm 10 \%$$

$$I_{mp} = 8 \text{ A} \pm 5 \%$$

Hodnoty navrženého panelu lze vidět v následující tabulce. Těchto panelů je v systému zapojeno 8 v sérii.

Tab. 6-1 Parametry FV panelu

FV panel	
I_{mp} [A]	8,34
U_{mp} [V]	30
P_{mp} [W]	250,32
I_k [A]	8,9
U_o [V]	38,5

Tomuto zapojení odpovídá odpor $R = 28,9 \Omega$.

6.2 Zapojení s technologií MPPT

Parametry FV panelů a odpor topného tělesa odpovídá hodnotám pro přímé připojení topného tělesa k FV panelům. Následně si musíme určit indukčnost měniče. Toto zapojení uvažuje měnič jako snižující (buck). Indukčnost poté vypočteme dosazením do vzorce (8):

$$L = \frac{120 \cdot (240 - 120)}{0,1 \cdot 8,9 \cdot 3600 \cdot 240} = 18,73 \text{ mH} \quad (19)$$

Zvlnění proudu ΔI se většinou volí mezi 20 – 40 % I_{max} , Pro lepší stabilitu byla v této práci uvažována hodnota 10 %. Hodnota I_{max} je uvažována hodnota proudu nakrátko FV panelu, a to hodnota 8,9 A. hodnota frekvence se volí většinou kolem 20 kHz kvůli zamezení zvukovým efektům a malým spínacím ztrátám. V simulaci je uvažována hodnota 3600 Hz pro snížení počtu výpočtů. Vstupní napětí je uvažováno U_{mp} a to 240 V. Výstupní napětí je uvažováno při střídě $D = 0,5$ jelikož to vede k největšímu zvlnění.

Výstupní kapacitu vypočteme ze vztahu (9)

$$C = \frac{0,1 \cdot 8,9}{8 \cdot 3600 \cdot 0,05 \cdot 120} = 5,15 \mu F \quad (20)$$

V této práci je uvažováno zvlnění jako 5 % výstupního napětí.

6.3 Zapojení s akumulací energie

Parametry FV panelů jsou stejné jako v předchozích zapojení. V tomto modelu ale uvažujeme 10 panelů zapojených v sérii. Nejdříve si určíme odpor topného tělesa. Napětí na topném tělese uvažujeme jako napětí sítě, a to hodnotu 325 V. Výkon tělesa budeme uvažovat 2 kW. Pro topné těleso tedy můžeme psát:

$$R = \frac{U^2}{P} = \frac{325^2}{2000} = 52,8 \Omega \quad (21)$$

Kde R je odpor topného tělesa (Ω), U je napětí na topném tělese (V) a P je výkon topného tělesa (W).

Buck

Indukčnost snižujícího měniče poté vypočteme dosazením do vzorce (8):

$$L = \frac{150 \cdot (300 - 150)}{0,1 \cdot 8,9 \cdot 3600 \cdot 300} = 23,41 \text{ mH} \quad (22)$$

Zvlnění proudu ΔI je uvažováno 10 %. Hodnota I_{\max} je uvažována hodnota proudu nakrátko FV panelu, a to hodnota 8,9 A. hodnota spínací frekvence je uvažována 3600 Hz. Vstupní napětí je uvažováno U_{mp} a to 300 V. Výstupní napětí je uvažováno při střídě $D = 0,5$, jelikož to vede k největšímu zvlnění.

Výstupní kapacitu vypočteme ze vztahu (9)

$$C = \frac{0,1 \cdot 8,9}{8 \cdot 3600 \cdot 0,05 \cdot 150} = 4,12 \mu\text{F} \quad (23)$$

Zvlnění je 5 % výstupního napětí.

Boost

Pro střidu můžeme psát

$$D = 1 - \frac{240}{325} = 0,26 \quad (24)$$

Vstupní napětí se předpokládá konstantní a jeho hodnota se bere jako nominální hodnota baterie a to 240 V. Výstupní napětí je 325 V, které odpovídá usměrněnému napětí sítě.

Indukčnost vypočítáme dosazením do vzorce (13)

$$L = \frac{240 \cdot (325 - 240)}{0,1 \cdot 16 \cdot 3600 \cdot 325} = 10,9 \text{ mH} \quad (25)$$

Zvlnění proudu opět uvažujeme jako 10 % I_{\max} . I_{\max} uvažujeme jako maximální vybíjecí proud baterie a to 16 A.

Kapacita výstupního kondenzátoru se poté vypočítá dosazením do vzorce (14)

$$C = \frac{6,16 \cdot 0,26}{3600 \cdot 0,05 \cdot 325} = 27,38 \mu F \quad (26)$$

Kde $I_{výst}$ je výstupní proud (A) a vypočítá se jako:

$$I_{výst} = \frac{U_{výst}}{R} = \frac{325}{52,8} = 6,16 A \quad (27)$$

Střída D pro zvednutí hladiny z 240 V na 325 V vychází jako 0,26. Jelikož uvažujeme topné těleso o výkonu 2 kW, jeho hodnota odporu pro hladinu napětí 325 V činí 52,8 Ω . Hodnota výstupního proudu je tedy podle Ohmova zákona 6,25 A. Zvlnění napětí uvažujeme znovu 5 %.

Usměrňovač

Kapacita výstupního kondenzátoru můstkového usměrňovače se vypočítá jako

$$C = \frac{I_{výst}}{\Delta U_{výst} \cdot 2 \cdot f} = \frac{6,16}{0,05 \cdot 325 \cdot 2 \cdot 50} = 3,79 mF \quad (28)$$

Zvlnění napětí uvažujeme 5 %.

Na základě výpočtů byli zvoleny tyto hodnoty součástek:

Tab. 6-2 Hodnoty součástek v zapojení MPPT

Snižující měnič	
L [mH]	20
C_{výst} [μF]	6
C_{vst} [μF]	100

Tab. 6-3 Hodnoty součástek v zapojení s akumulací energie

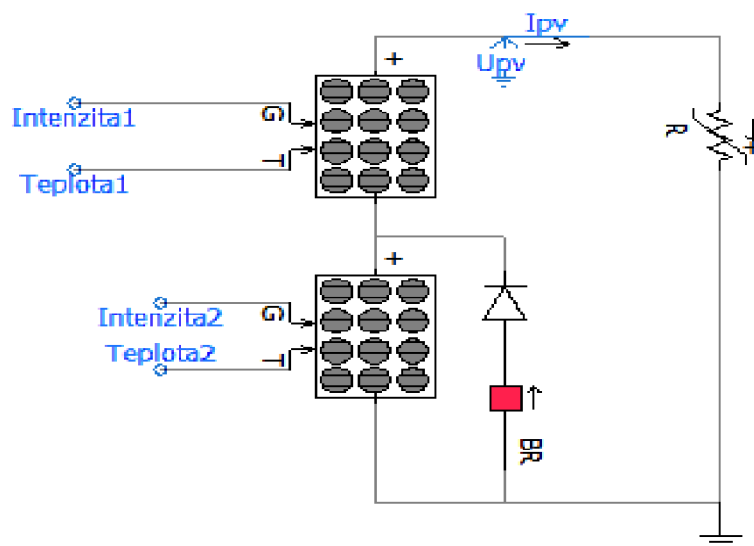
Snižující měnič	
L_{buck} [mH]	25
C_{výst} [μF]	5
Zvyšující měnič	
C_{vst} [μF]	100
L_{boost} [mH]	15
C_{výst} [μF]	30
Usměrňovač	
C_{sm} [μF]	4000

7 Provedení základních simulací

V této kapitole budou ukázány vytvořené modely v programu PSCAD a demonstrovány základní simulace těchto modelů.

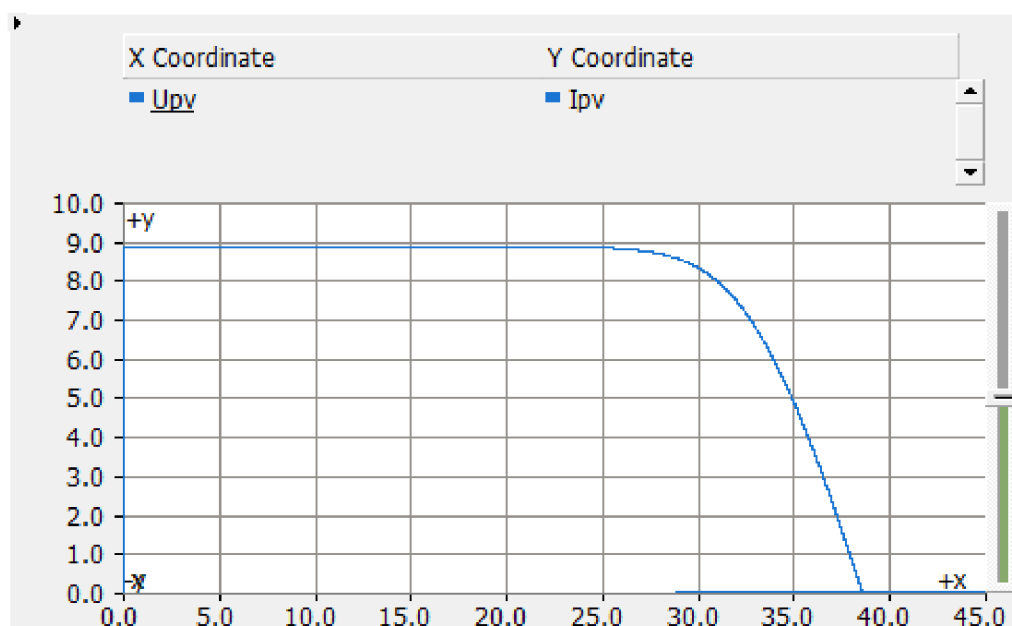
7.1 Model přímého připojení topné spirály k FVE

Tento model představuje fotovoltaický systém, kdy je topné těleso přímo propojeno s FVE. Model je také vhodný pro měření charakteristik samotného fotovoltaického panelu, jelikož lze v průběhu simulace měnit hodnotu odporu zátěže. Proto je model navržen tak, že lze přepínat mezi proměřením samotných charakteristik, kdy se v průběhu simulace hodnota odporu mění a provozem, kdy je hodnota odporu pevně dána.



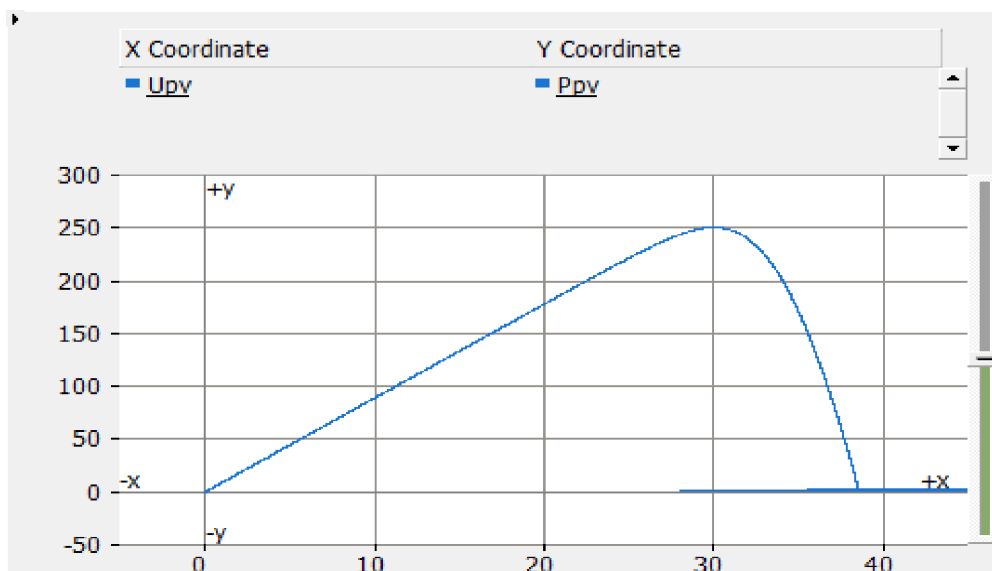
Obr. 7.1 Model přímého připojení topné spirály

Následující obrázek ukazuje Voltampérovou charakteristiku zvoleného fotovoltaického panelu při podmínkách STC.



Obr. 7.2 Zatěžovací charakteristika zvoleného FV panelu

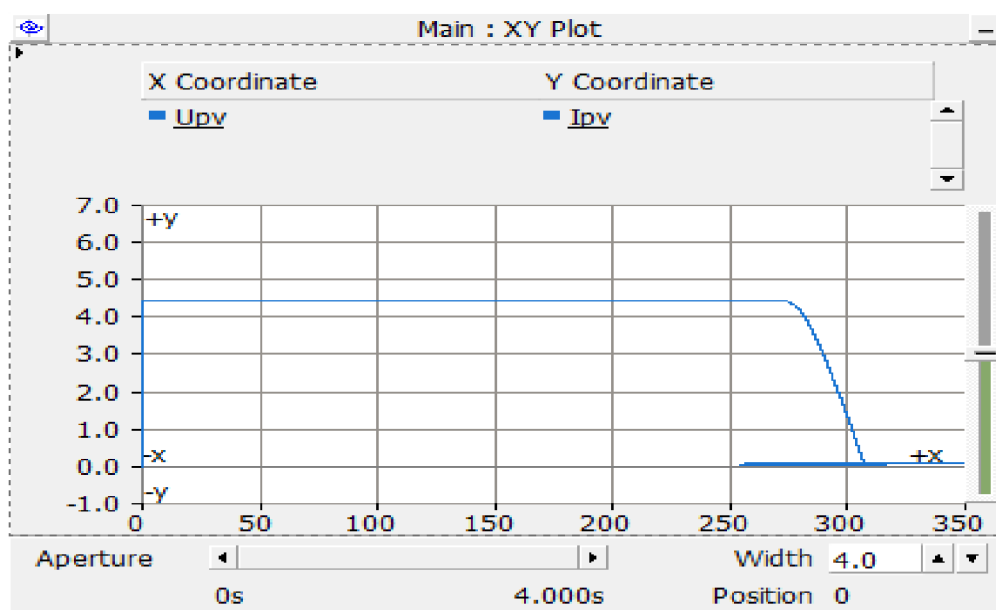
Následující obrázek ukazuje výkonovou charakteristiku fotovoltaického panelu při podmínkách STC.



Obr. 7.3 Výkonová charakteristika zvoleného FV panelu

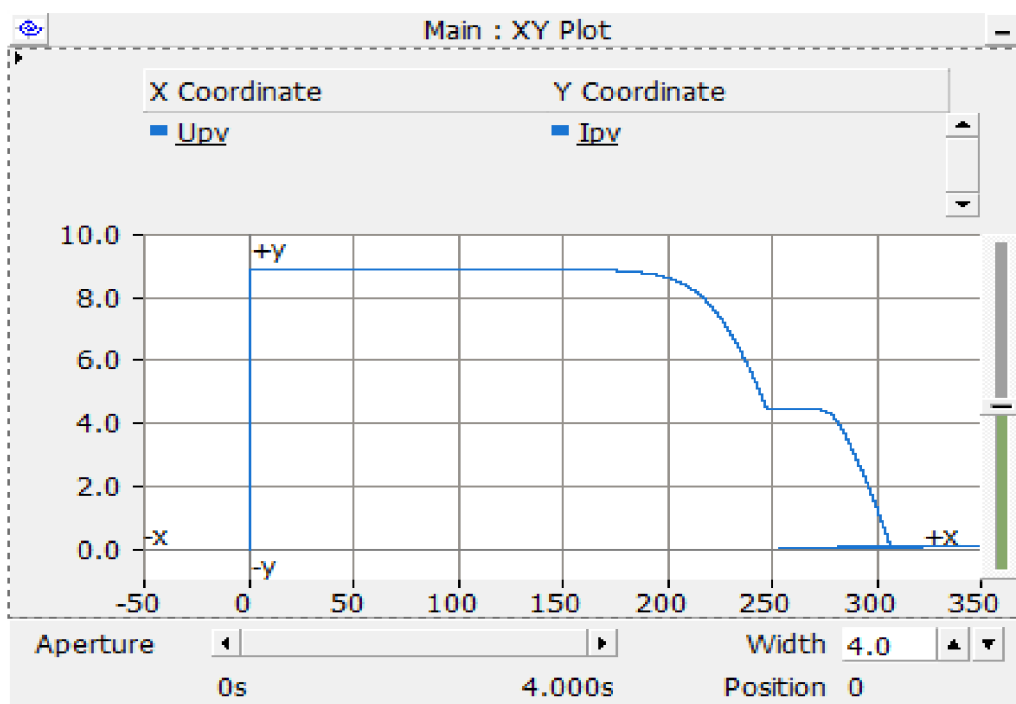
Ze simulací zatěžovací a výkonové charakteristiky lze potvrdit parametry fotovoltaického panelu udané v tabulce.

V následující simulaci si ukážeme vliv částečného stínění fotovoltaických panelů. Simulace je provedena v zapojení z obr. 7-1. Na obrázku jsou k vidění dva bloky fotovoltaických panelů. Horní blok obsahuje 7 panelů zapojeno v sérii a dolní blok obsahuje osmý panel. U každého bloku lze nastavovat intenzitu dopadajícího záření a teplotu panelů. Při této simulaci byly teploty obou bloků shodné a to 25 °C. Intenzita ale byla rozdílná. Hodnota intenzity prvního bloku činila 1000 W/m² a hodnota intenzity druhého bloku 500 W/m². Při těchto hodnotách se provedlo měření zatěžovací charakteristiky. Ze simulace je zřejmé, že dodávaný proud v sériovém zapojení více panelů určuje právě ten panel, který je nejvíce zastíněn



Obr. 7.4 Zatěžovací charakteristika při částečném stínění panelů bez použití obtokové diody

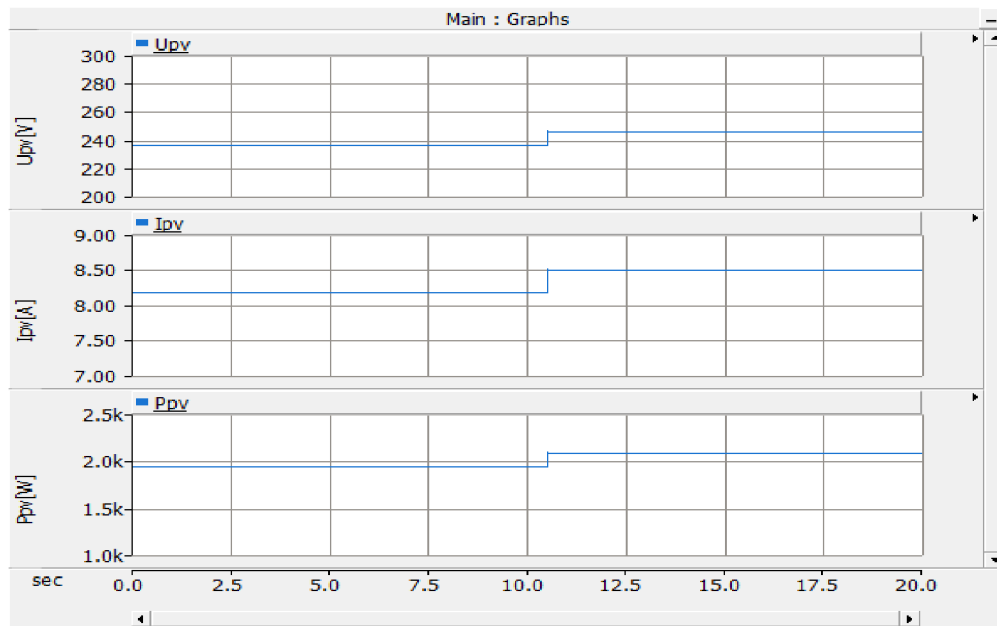
Další simulace je provedena pro případ, kdy je paralelně k zastíněnému panelu připojena obtoková dioda. Zapojení a podmínky jsou tedy totožné jako u předchozí simulace, zde je ale připojena dioda. Z provedené simulace lze vidět, že je zatěžovací charakteristika FV panelů značně deformována. Tato deformace také způsobuje výskyt lokálních bodů maximálního výkonu. Méně komplikované algoritmy jsou při prudkých změnách intenzity záření na tyto lokální maxima náchylné a může se tudíž stát, že algoritmus zvolí špatný směr a nedosáhne bodu největšího výkonu celé charakteristiky ale pouze lokálního maxima.



Obr. 7.5 Zatěžovací charakteristika při částečném zastínění panelů s použitím obtokové diody

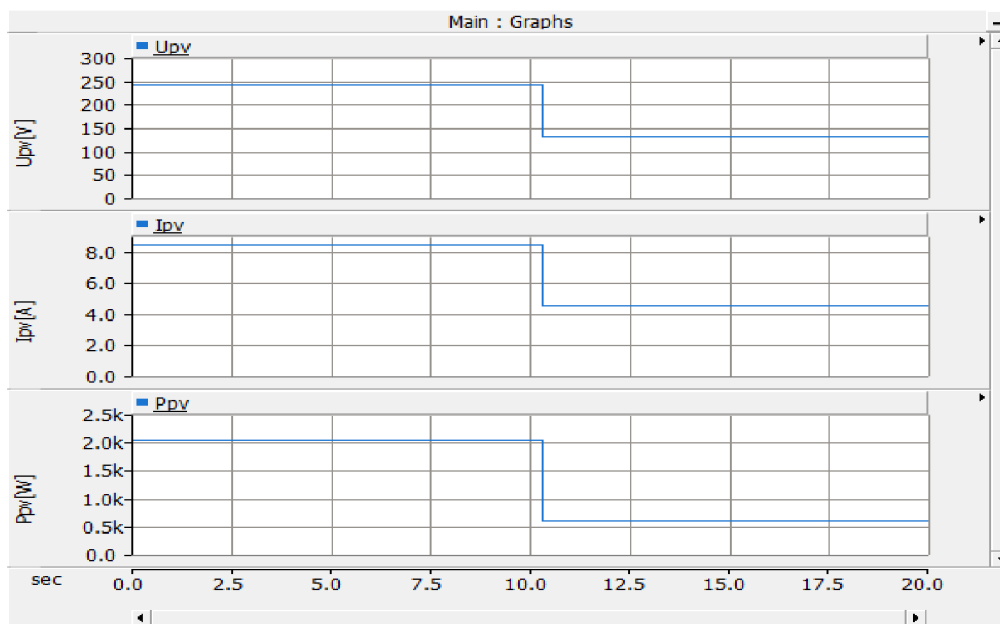
Jak lze vidět ze simulace při částečném stínění je proud dodávaný panely ovlivněn pouze nejvíce zastíněným panelem. Proto se paralelně k panelů, zapojují bypass diody, které způsobují, že při stínění panelu proud z ostatních panelů zastíněný panel obteče. Částečné stínění ale také způsobuje vznik dvou maxim maximálního výkonu, který způsobuje při prudkých změnách podmínek značné problémy algoritmům MPPT.

Následující simulace ukazuje, jak se mění napětí panelu, dodávaný proud a výkon při změnách teploty. Intenzita slunečního záření byla nastavena na 1000 W/m^2 . Simulace byla navržena tak, že se cíleně změnila teplota FV panelů z hodnoty $50 \text{ }^\circ\text{C}$ na hodnotu $25 \text{ }^\circ\text{C}$.



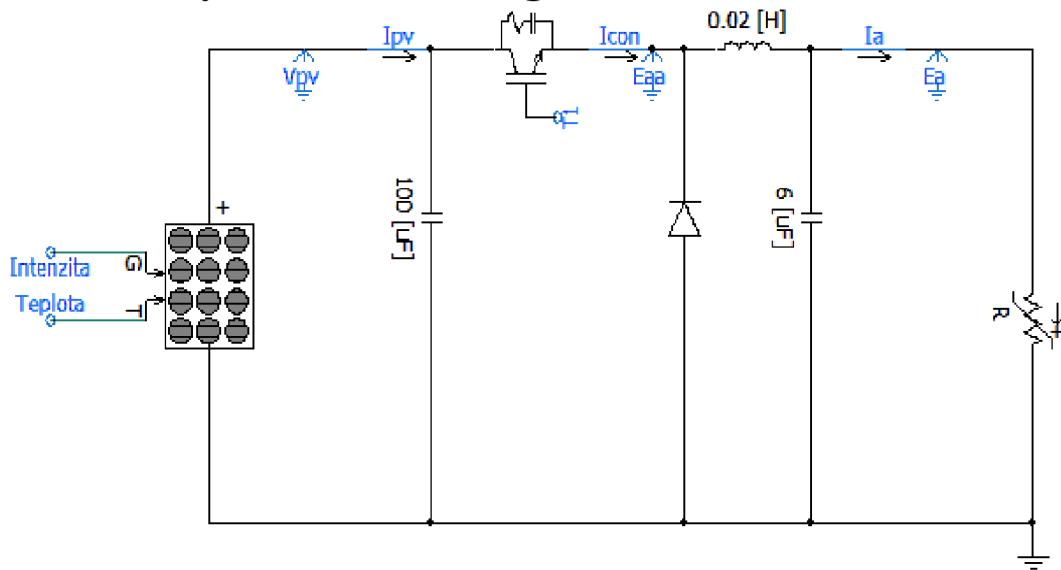
Obr. 7.6 Průběh napětí FV panelů (nahore), proudu dodávaný FV panely (veprostřed) a dodávaný výkon (dole) při změně teploty

Další simulace demonstruje závislost stejných parametrů jako simulace předchozí, avšak v závislosti na intenzitě záření. Teplota panelů byla nastavena na 25 °C. Tato simulace byla navržena tak, že se cíleně změnila intenzita záření z hodnoty 1000 W/m² na hodnotu 500 W/m².



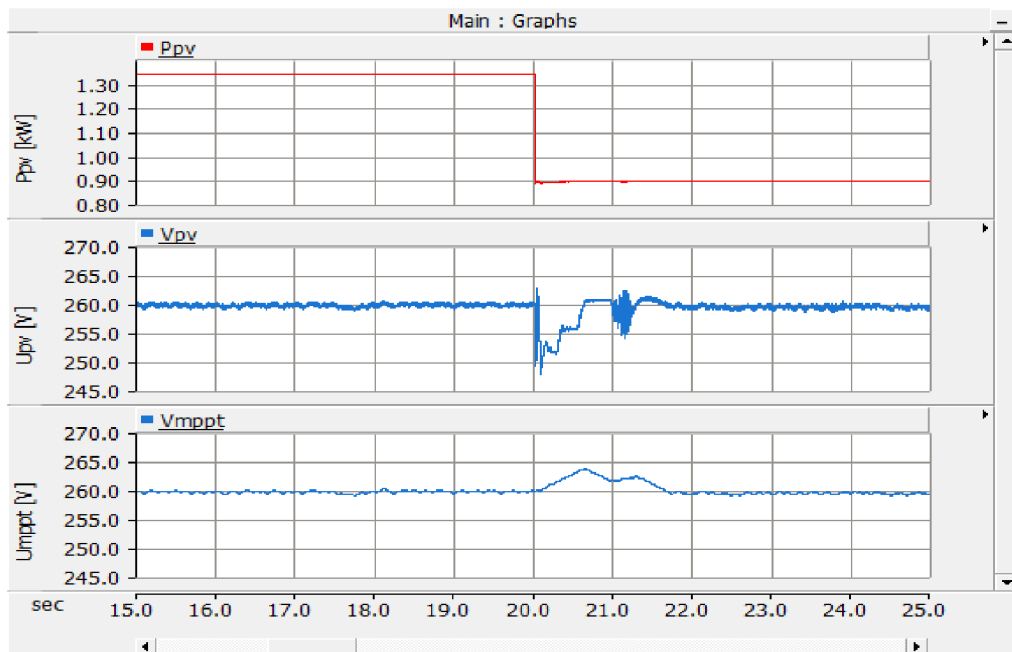
Obr. 7.7 Průběh napětí FV panelů (nahore), proudu dodávaný FV panely (veprostřed) a dodávaný výkon (dole) při změně intenzity slunečního záření

7.2 Model FV systému s technologií MPPT



Obr. 7.8 Model zapojení s technologií MPPT

Následující simulace ukazuje regulaci MPPT při různých intenzitách slunečního záření. Simulace byla navržena tak, že v čase 20 s se řízení přenastaví hodnota intenzity slunečního záření z hodnoty 600 W/m^2 na hodnotu 400 W/m^2 . Celkový čas simulace byl 50 s. Vykreslen byl pouze interval 15 – 25 s. Krok simulace byl nastaven na $20 \mu\text{s}$. Obrázek 3 demonstruje odezvu dodávaného výkonu FVE, napětí na panelech v průběhu simulace a také napětí generované algoritmem MPPT. Algoritmus tedy při změně záření reguluje napětí na fotovoltaických panelech na hodnotu maximálního dodávaného výkonu. Překmit napětí na fotovoltaických panelech při změně intenzity záření činil 10 V.



Obr. 7.9 Dodávaný výkon FV panely při různých hodnotách intenzity záření (nahore), napětí na FV panelech v průběhu změny intenzity záření (ve středu), napětí generované algoritmem MPPT (dole)

Následující tabulka obsahuje hodnoty intenzity slunečního záření dopadající na panely během dne. Tyto hodnoty byli převzaty z prohlížečového softwaru PVGIS. Hodnoty času byli přepsány tak, aby odpovídali času v České Republice. Dále byli vybrány jenom hodnoty v hodinových časových intervalech. Následně tabulka obsahuje také hodnoty teplot okolí v jednotlivých hodinách. Pro tyto hodnoty byli provedeny simulace a byl zjištěn dodávaný výkon v jednotlivých hodinách pro případ, kdy je topné těleso přímo připojeno na FV panely a pro případ, kdy je zařazena technologie MPPT. Nakonec je uveden součet dodané elektrické energie za celý den.

Tab. 7-1 Hodnoty dodávaného výkonu během dne pro přímo připojené topné těleso a zapojení s technologií MPPT

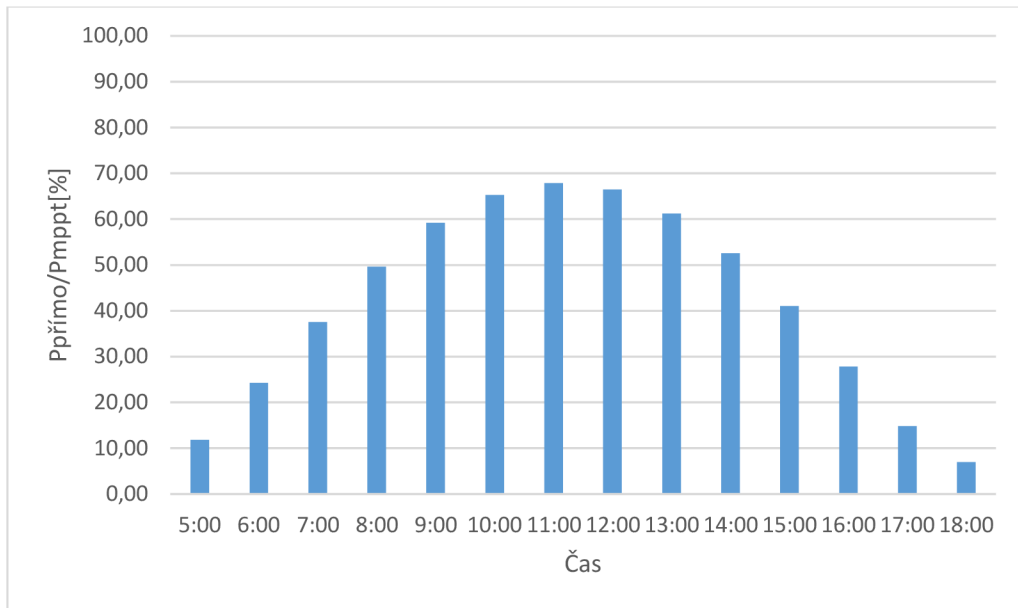
Čas	G [W/m ²]	T [°C]	P _{Přímo} [W]	P _{MPPT} [W]
5:00	104	18,1	24,4	206,5
6:00	219	19,4	108,5	447
7:00	341	20,6	263,7	702
8:00	450	21,5	460,1	927
9:00	535	22,2	651,3	1100
10:00	589	22,6	790	1210
11:00	610	22,9	847,8	1250
12:00	598	23,1	815	1226
13:00	551	23,1	692	1131
14:00	474	22,9	512	974
15:00	370	22,3	311,6	760
16:00	250	21,4	142	510
17:00	131	20,3	38,9	261,7
18:00	59	19,1	7,9	113,7
Dodáno energie [kWh]			5665,2	10818,9

Pokud porovnáme celkovou dodanou energii obou zapojení, dokážeme určit přínos technologie MPPT. Použijeme tedy vzorec

$$\Delta\eta = \frac{E_{\text{Přímo}} - E_{\text{MPPT}}}{E_{\text{MPPT}}} \cdot 100 = \frac{5665,2 - 10818,9}{10818,9} \cdot 100 = -47,64 \% \quad (28)$$

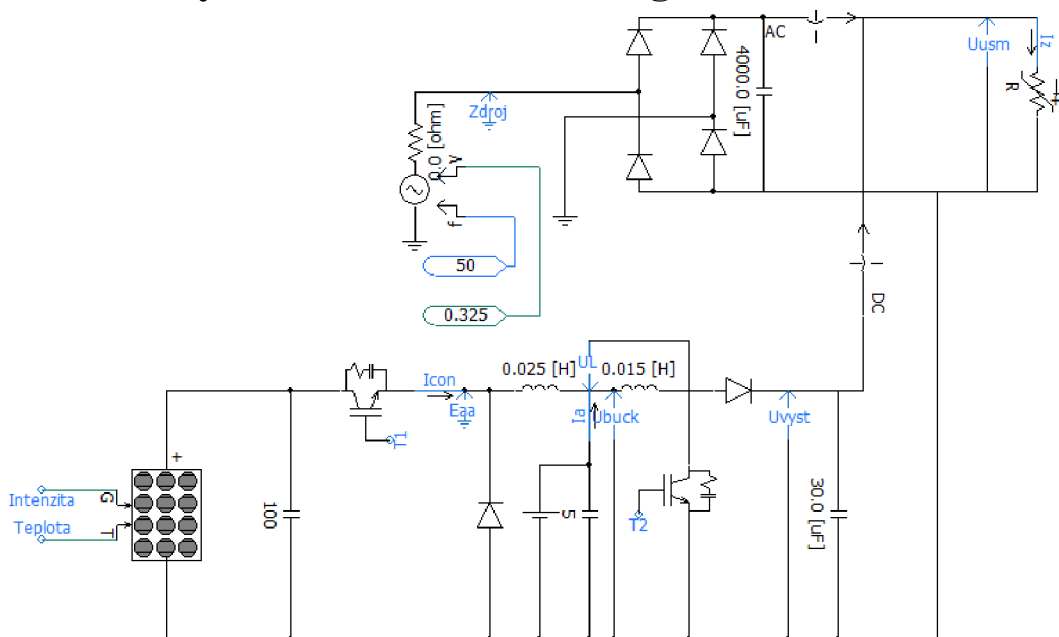
Z tohoto vzorce nám tedy vyplývá, že při použití technologie MPPT v běžném letním dni dodá naše FVE o 47,64 % více energie, než když je topná spirála připojena napřímo. Samozřejmě je třeba si uvědomit, že použité hodnoty teplot jsou teploty okolí. Samotná teplota panelu je o něco vyšší. Také musíme počítat s jistou nepřesností programu PVGIS. Dále si také musíme uvědomit, že velkou roli hraje i výkon topného tělesa. Použité topné těleso je parametrizováno na hodnotu intenzity 1000 W/m². Pokud bychom tedy parametrizovali topné těleso na menší hodnotu intenzity, nebude rozdíl tak velký. Skutečná hodnota přírůstku dodané energie bude tedy o něco menší.

Na následujícím obrázku lze vidět, jak se během průměrného letního dne mění výkon dodávaný do topné spirály při přímém spojení s fotovoltaickými panely. Tyto hodnoty jsou procentuálně vztaženy k hodnotám dodávaného výkonu v zapojení s technologií MPPT



Obr. 7.10 Procentuální hodnoty dodávaného výkonu přímého zapojení topné spirály vztahované k výkonu dodávaném při zapojení technologie MPPT

7.3 Model FV systému s akumulací energie



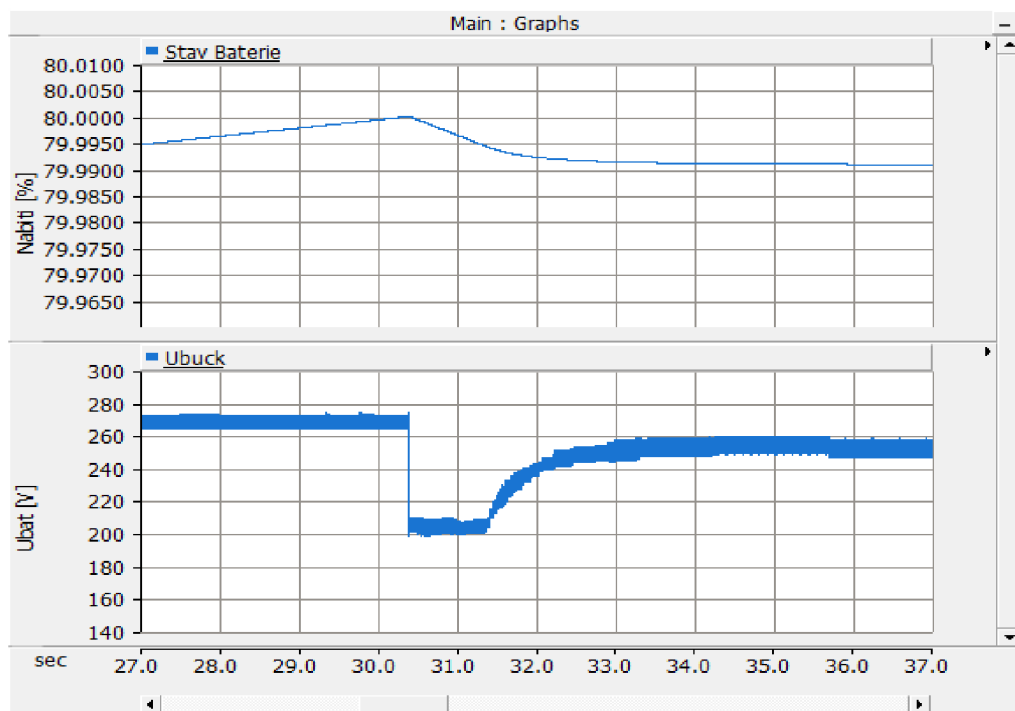
Obr. 7.11 Model zapojení s akumulací energie

Jak lze z obrázku vidět, tento model je jak z pohledu zapojení komplexnější než předchozí dva. Tento model umožňuje jak hledání bodu maximálního výkonu, tak regulaci výstupního napětí. Technologii MPPT zaručuje snižující měnič, regulaci výstupního napětí zase měnič zvyšující. Mezi tyto dva měniče je zapojena baterie, která slouží jak pro dodávku elektrické energie, kdy nejsou FV panely schopny energii dodávat, tak ke stabilizaci napětí. Výstupní napětí je regulováno na hodnotu 325 V. Tato hodnota odpovídá hodnotě usměrněného napětí distribuční sítě. Pokud je baterie příliš vybita a panely nejsou schopny dodávat energii, zajišťuje dodávku energie distribuční sítí.

Tento model pracuje ve třech režimech:

- Panely dodávají dostatečné množství energie a akumulátor je plně nabit → Topná spirála je připojena k panelům a snižující měnič reguluje napětí baterie na hodnotu 250 V
- Panely dodávají dostatečné množství energie a akumulátor není plně nabit → Topná spirála je připojena k panelům a snižující měnič pracuje v režimu MPPT
- Panely nedodávají dostatečné množství energie a akumulátor je vybitý → Topná spirála je připojena k distribuční síti

Na následující simulaci je ukázána regulace napětí na baterii při plném nabití baterie.



Obr. 7.12 Regulace napětí baterie

Simulace ukazuje případ, kdy baterie dosáhne hodnoty nabití 80 %. Před dosažením této hodnoty FV systém pracoval v režimu MPPT a dodával tedy maximální výkon. Při dosažení této hodnoty napětí se ale systém přepnul na regulaci napětí na baterii. Je to z toho důvodu, aby se baterie příliš nepřebila. Po předpnutí režimu tedy systém reguluje napětí na baterii na hodnotu 254 V.

8 Závěr

V teoretické části této práce jsem se zabýval nejprve možným zapojením FV systémů vzhledem k napojení na DS a jak je v těchto systémech řešen ohřev užitkové vody. V této kapitole byly také uvedeny výhody a nevýhody těchto systémů, základní popis zařízení pro ohřev užitkové vody dostupný na trhu. Následně byly popsány základní rovnice popisující fotovoltaický článek a vliv různých vlivů na zatěžovací charakteristiku článku. Byli také popsány typy fotovoltaických panelů, které se běžně používají na budovách. Dále byly popsány základní typy DC-DC měničů a základní algoritmy pro hledání bodu maximálního výkonu (MPPT). Z rozboru těchto algoritmů vyplývá, že nejpoužívanější algoritmus je Perturb and Observe. Tento algoritmus je vzhledem k malé komplexnosti schopen spolehlivě ve většině podmínkách bod maximálního výkonu vyhledat. Poté jsou určeny vstupní veličiny pro návrh a simulaci modelů. Také je vysvětleno, jaké zjednodušující předpoklady se při návrhu těchto modelů uvažují. Poté jsou součástky jednotlivých modelů navrhnuty.

Praktická částí byli nejdříve vytvořeny modely v programu PSCAD, a následně byli provedeny základní simulace demonstrující chování těchto systémů. Nejdříve byli provedeny simulace na modelu, kdy je topné těleso přímo připojeno na FV panely. V režimu proměňování charakteristik, byla zjištěna voltampérová a výkonová charakteristika FV panelu. Z těchto charakteristik byli zjištěny základní parametry FV panelu. Následně byla provedena simulace voltampérové charakteristiky pro případ, kdy je jeden z panelů zastíněn. Ze simulace vyplynulo, že v sériovém zapojení více panelů, je voltampérová charakteristika určena nejméně osvětleným panelem. Další simulace je totožná s předchozí simulací s tím rozdílem, že je paralelně k zastíněnému panelu připojena obtoková dioda. Ze simulace vyplývá veliký význam těchto diod na provoz fotovoltaických systémů. Jelikož jsou z finančních důvodů na jeden panel použity pouze jedna, či dvě diody, vyplývá z toho že zastínění pouze části panelu stačí k ovlivnění výstupní charakteristiky celého panelu. Následně jsou provedeny simulace vlivu intenzity a teploty na provozní parametry článku, které potvrzují teoretický rozbor. V modelu zapojení s technologií MPPT byla provedena simulace, která ověřila funkčnost regulace systému. Při změně intenzity záření algoritmus správně reguloval napětí fotovoltaických panelů na hodnotu bodu maximálního výkonu. Z prohlížečového softwaru PVGIS jsou také převzaty hodnoty teploty a intenzity slunečního záření v průměrném červencovém dni. Pro tyto hodnoty byli poté provedeny simulace dodávaného výkonu při zapojení topného tělesa přímo na fotovoltaické panely a při zapojení s technologií MPPT. Z této simulace vyplývá velký přínos zapojení technologie MPPT. Nakonec jsou ukázány základní simulace v zapojení s akumulací energie demonstrující způsob řízení takového systému.

Dobré je také si uvědomit rozsah možností těchto modelů. Jistá nevýhoda vytvořených modelů je, že v nich není začleněna kalorimetrická rovnice. Z tohoto důvodu nemůžeme sledovat oteplení vody v bojleru. Modely slouží tedy jen ke zkoumání elektrické části systému. Modely nám ale umožňují udělat si představu o tom, kolik energie je takový systém za jistých provozních podmínek dodat.

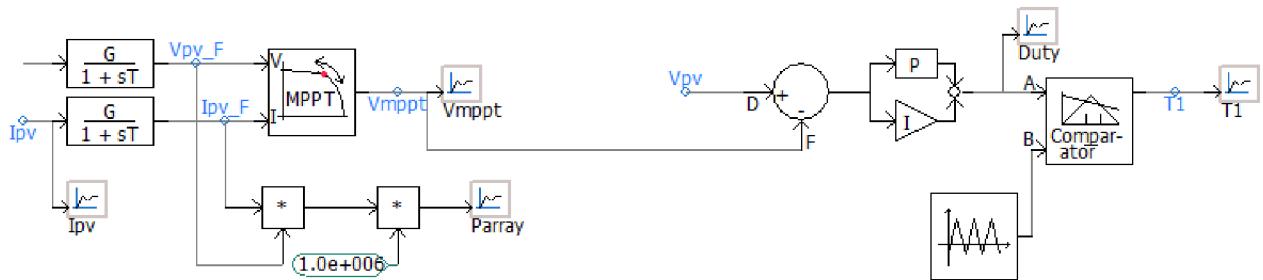
Seznam použité literatury

1. MASTNÝ, Petr. *Obnovitelné zdroje elektrické energie*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 9788001049372.
2. *SOLÁRNÍ EXPERTI* [online]. ČR [cit. 2016-11-28]. Dostupné z: <https://www.solarniexperti.cz/jak-funguje-fotovoltaicky-ohrev-vody/>
3. QUASCHNING, Volker. *Obnovitelné zdroje energií*. Praha: Grada, 2010. Stavitel. ISBN 9788024732503.
4. BELÁŇ, Anton. Model fotovoltaického článku. In: *Posterus* [online]. SK, 2013 [cit. 2017-01-09]. Dostupné z: <http://www.posterus.sk/?p=16396>
5. LUQUE, A. a Steven. HEGEDUS. *Handbook of photovoltaic science and engineering*. Hoboken, NJ: Wiley, c2003. ISBN 0471491969.
6. HASELHUHN, Ralf. *Fotovoltaika: budovy jako zdroj proudu*. Ostrava: HEL, 2011. ISBN 9788086167336.
7. ERICKSON, Robert W. DC-DC converters. *Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering* [online]. [cit. 2017-01-10]. Dostupné z: <http://ecee.colorado.edu/ecen4517/materials/Encyc.pdf>
8. SKOUPÝ, Petr. *Vzorové moduly DC/DC měničů* [online]. Brno, 2010 [cit. 2017-01-10]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=28545
9. MORALES, David Sanz. *Maximum Power Point Tracking Algorithms for Photovoltaic Applications* [online]. Espoo, 2010 [cit. 2017-01-10]. Dostupné z: <http://lib.tkk.fi/Dipl/2010/urn100399.pdf>
10. Podmínky oblasti podpory C. *Nová zelená úsporám* [online]. [cit. 2017-03-14]. Dostupné z: <http://www.novazelenausporam.cz/podminky-oblasti-podpory-c-3-vyzva/>
11. ALLI, Sokni-Sita, Slavisa JOVANOVIĆ, Philippe POURE a Ehsan JAMSHIDPOUR. MPPT and output voltage control of Photovoltaic systems using a Single-Switch DC-DC converter. In: *2016 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON)* [online]. IEEE, 2016, s. 1-6 [cit. 2017-06-09]. DOI: 10.1109/ENERGYCON.2016.7514123. ISBN 9781467384636. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7514123/>
12. HAUKE, Brigitte. Basic Calculation of a Boost Converter's Power Stage. In: *Texas Instruments* [online]. 2009 [cit. 2017-03-15]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/an/slva372c/slva372c.pdf>
13. HAUKE, Brigett. Basic Calculation of a Buck Converter's Power Stage. In: *Texas Instruments* [online]. 2011 [cit. 2017-03-15]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/an/slva477b/slva477b.pdf>
14. ROSS, J.N. *The essence of power electronics*. New York: Prentice Hall, 1997, 217 s. ISBN 0-13-525643-7.

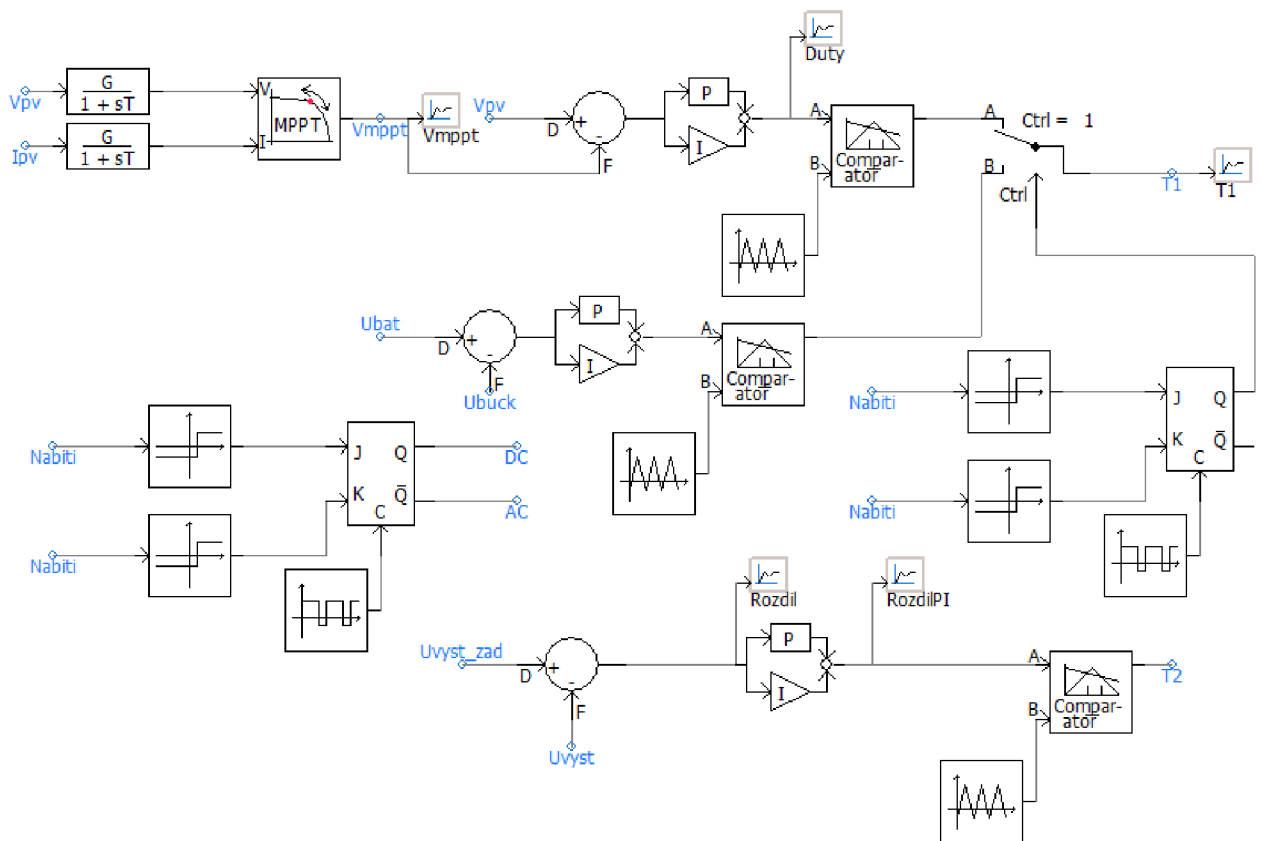
-
15. AHAMED, M. H. F, U. D. S. D DISSANAYAKE, H. M. P DE SILVA, H. R. C. G. P KUMARA a N. W. A LIDULA. Designing and simulation of a DC microgrid in PSCAD. In: *2016 IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON)* [online]. IEEE, 2016, s. 1-6 [cit. 2017-06-09]. DOI: 10.1109/POWERCON.2016.7753856. ISBN 9781467388481. Dostupné z: / <http://ieeexplore.ieee.org/document/7753856/>

9 Přílohy

Příloha A



Obr. 9.1 Regulace zapojení s technologií MPPT



Obr. 9.2 Regulace zapojení s akumulací energie