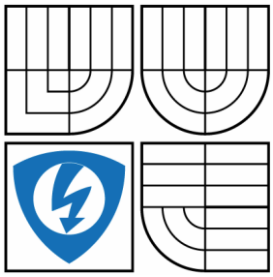


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

MODEL SOLÁRNÍ ELEKTRÁRNY

MODEL OF PHOTOVOLTAIC POWER PLANT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR´S THESIS

AUTOR PRÁCE — LUKÁŠ JANIC
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — Ing. LIBOR VESELÝ, Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Automatizační a měřicí technika

Student:	Lukáš Janic	***ID:***	146844
Ročník:	3	***Akademický rok:***	2013/2014

NÁZEV TÉMATU:

Model solární elektrárny

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je navrhnout model solární elektrárny v prostředí Matlab/Simulink. Zadání lze shrnout do následujících bodů:
1. Zpracujte rešerši týkající se modelování fotovotaických článků a fotovoltaických panelů.
2. Prozkoumejte možnosti využití SimPowerSystems Toolboxu a vytvořte model solární elektrárny v prostředí Matlab/Simulink.
3. Navrhněte MPPT (maximal power point tracking) algoritmus pro přenos maximálního výkonu z fotovoltaického článku.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Kreith, F., Kreider J. F.: Principles of Sustainable Energy, CRC Press, 2011, ISBN 978-1-4398-1407-9.

Termín zadání:	10.2.2014	***Termín odevzdání:***	26.5.2014

Vedoucí práce: Ing. Libor Veselý, Ph.D.

Konzultanti semestrální práce:

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.

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.

Abstrakt

Bakalárska práca o modelovaní solárnej elektrárne v prostredí Matlab. V prvej časti sa práca venuje historií spracovania slnečnej energie, princípu činnosti a konštrukcii fotovoltaického článku a meničov napätia. V druhej časti sa zaoberá návrhom solárnej elektrárne v prostredí Matlab-Simulink. V poslednej časti sú ukázané simulované modely a ich nasimulované charakteristiky.

Klíčová slova

Solárna elektráreň, fotovoltaický panel, menič napätia, riadenie meniča, MPPT

Abstract

Bachelor’s thesis about modeling of photovoltaic power plant in Matlab. In the first part of the thesis deals with the processing history of solar energy, operating principle and construction of the photovoltaic cell and a voltage converters. The second part deals with the design of solar power plant in Matlab-Simulink. In the last section are shown simulated models and their simulated characteristics.

Keywords

Solar power plant, photovoltaic panel, power inverter, control of the inverter, MPPT

Bibliografická citace:

JANIC, L. *Model solární elektrárny.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 40 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Libor Veselý, Ph.D..

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Model solární elektrárny jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářske 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 bakalářske práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářske 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: **13. květen 2014** ……
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Liborovi Veselému, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.
Ďalej by som chcel poďakovať firme RMC s.r.o., za umožnenie pracovať na projekte a jeho následne použitie do tejto práce.

V Brně dne: **13. květen 2014** ……

podpis autora

Obsah

1 Úvod 8
2 Základné časti solárnej elektrárne 9
2.1 Bloková schéma solárnej elektrárne 9
2.2 Fotovoltaický panel 9
2.2.1 História 9
2.2.2 Fotovoltaický jav 10
2.2.3 Základné parametre 10
2.2.4 Náhradná schéma fotovoltaického článku 11
2.2.5 Matematický model fotovoltaického článku 12
2.3 DC-DC meniče 15
2.3.1 DC-DC boost menič 16
2.3.2 DC-DC buck menič 17
2.4 DC-AC meniče 17
2.4.1 DC-AC menič s plným "H" mostíkom 18
2.5 MPPT- algoritmus prenosu maximálneho výkonu z FV panelu 20
2.5.1 Perturbation and Observation 20
2.5.2 Incremental Conductance 22
3 Modelovanie častí solárnej Elektrárne 24
3.1 Fotovoltaický panel 24
3.1.1 Simulácia charakteristík reálneho fotovoltaického panelu ReneSola JC250S 25
3.2 DC-DC boost menič 29
3.3 DC-AC menič s plným „H" mostíkom 31
3.4 MPPT Perturbation and Observation 34
4 Záver 38
5 40

1 ÚVOD

Dôvodom výberu tejto témy je obrovský potenciál slnečnej energie, ktorá je najdostupnejšia a najčistejšia forma obnoviteľnej energie, ktorú môžeme získať.

V priemere počas jasného dňa dopadne na zem 1000W/m^2 čo znamená ročný dopad slnečnej energie na Slovensku a v Česku približne 950-1200kWh/m^2. Princípy premien slnečnej energie spočívajú buď v nepriamej premene tj. premena energie napr. na tepelnú a až následná premena tepelnej energie na elektrickú. Účinnosť nepriamej premeny je vyššia ako u priamej, ktorá už z podstaty slova priamo premieňa slnečnú energiu na elektrickú.

Nakoľko podstata témy je úzko spojená len s priamou premenou slnečnej energie, tak sa ďalej s nepriamou premenou slnečnej energie nebudeme v tejto práci zaoberať.

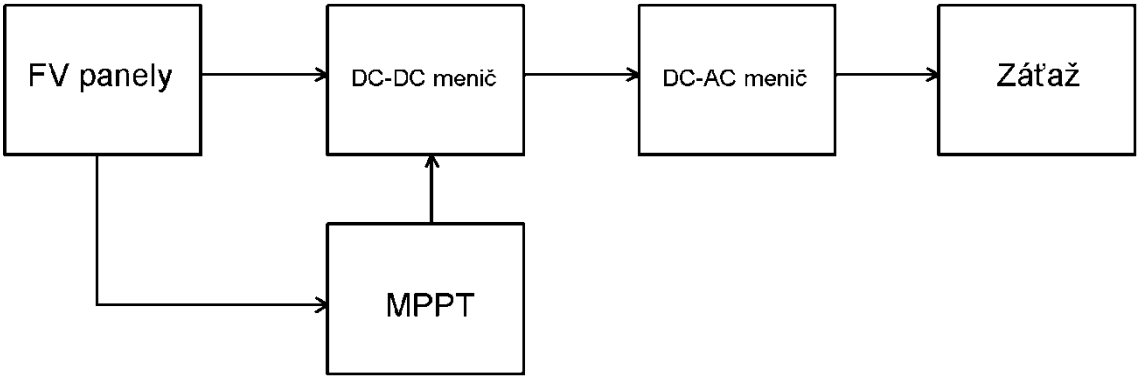
Na začiatok si niečo povieme o fotovoltaických článkoch, podstate vzniku elektrickej energie v nich, ďalej sa pozrieme trochu hlbšie do matematickej podstaty fotovoltaického panelu. Následne si rozoberieme meniče napätia, ich druhy, princípy funkcie a spôsoby riadenia, či už algoritmom MPPT (maximum power point tracking) alebo napäťovým regulátorom.

Ďalej budeme už pokračovať praktickými simuláciami reálnych fotovoltaických panelov, DC-DC meničov, DC-AC meničov a MPPT algoritmu, kde si povieme niečo už ku konkrétnym modelom, ich rozhraniu, spôsobom nastavení a simulácií rôznych veličín a výstupných charakteristík.

2 ZÁKLADNÉ ČASTI SOLÁRNEJ ELEKTRÁRNE

2.1 Bloková schéma solárnej elektrárne

Na Obrázku 1 sa nachádza bloková schéma solárnej elektrárne, kde môžeme vidieť všetky bloky potrebné pre jej realizáciu. Jedná sa len o základné bloky, ktoré nezahŕňajú filtračné a ochranné obvody, ktoré sú samozrejme pre praktickú realizáciu nevyhnutné, no nakoľko sa táto práca zaoberá len čisto o dokázanie funkčnosti jednotlivých blokov a následne celej solárnej elektrárne v prostredí Simulink, tak som ich do nej nezahrnul.



Obrázok 1

Blok FV panely sú fotovoltaické panely spájané sériovo, paralelne alebo sériovo-paralelne, podľa potreby a využitia. Sú zdrojom elektrickej energie, ktorá je spracovávaná ďalšími blokmi. Blok MPPT je algoritmus na riadenie DC-DC meniča pre získanie maximálního výkonu do rôznej veľkosti záťaže. DC-AC menič slúži na transformáciu jednosmerného napätia z DC-DC meniča na striedavé sieťové napätie.

Každý z blokov si podrobne rozoberieme a nasimulujeme v prostredí Matlab-Simulink.

2.2 Fotovoltaický panel

Fotovoltaika je oblasť, ktorá sa zaoberá priamou premenou slnečnej energie na energiu elektrickú. Na jej premenu sa využivajú fotovoltaické články poskladané do veľkoplošných fotovoltaických panelov.

2.2.1 História

História fotovoltaiky siahá až do roku 1839, kedy ako prvý pozoroval Becquerel fotovoltaický jav. Ponáraním dvoch elektród do elektrovodivého roztoku osvieteného žiarením pozoroval nárast napätia na elektródach.

Fotovoltaický jav sa však začal využívať na priamu premenu žiarenia na elektrickú energiu až v polovici 20.storočia. Jednalo sa o potreby kozmického výzkumu, nakoľko to bol jediný využiteľný systém na napájanie vo vesmírných podmienkach po štiepení jadra. Od 21.storočia sa fotovoltaické systémy využívaju vo viac ako 100 krajinách sveta, tvorí však len približne 1% svetovej produkcie elektrickej energie. [3]

2.2.2 Fotovoltaický jav

Princíp spočíva v dopadajúcom fotóne na polovodič s PN priechodom, ktorý excituje elektrón a vytvorí tak dva držitele náboja - voľný elektrón a dieru. Polovodič teda fotočlánok je tvorený dvoma vrstvami, vrchou vrstvou N a spodnou vrstvou P.

K vrchnému polovodiču typu N je pripojená kovová mriežka, z ktorej vývod tvorí záporný pól fotočlánku a k spodnej vrstve P je pripojený kovový kontakt, ku ktorému je zase pripojený kladný pól fotočlánku. Celá táto vrstva má cca 100um hrúbku.

Akonáhle prenikne fotón k PN prechodu, dôjde k fotoefektu a voľné elektróny sa uvoľnia do vrchnej vrstvy. Elektróny v spodnej vrstve začnú prechádzať z jedného na druhý tak, aby zaplnili všetky prázdne miesta. Vrchné voľné elektróny začnú tiecť cez pripojenú kovovú mriežku a vodiče do pripojenej záťaže fotočlánku.

2.2.3 Základné parametre

- Prúd nakrátko
- Napätie naprázdno
- Pracovný bod
- MPP (maximal power point)- bod maximálneho výkonu
- FF-fill factor
- Účinnosť FČ
- Difúzna kapacita FČ, bariérová kapacita FČ

Prúd nakrátko

Je to charakteristická hodnota, ktorá sa zväčša vyznačuje aj na V-A charakteristike. Jedná sa logicky o maximálny prúd, ktorý môže článok dodať pri danej intenzite žiarenia Irr. Tento parameter I_{sc} je zobrazený na V-A charakteristike fotovoltického panelu.

Napätie naprázdno

Určuje napätie na výstupe FČ naprázdno, teda bez pripojenej záťaže. Je to maximálne napätie na výstupe, pri danej intenzite žiarenia a teplote. Taktiež ako prúd nakrátko je tento parameter U_{oc} zobrazený na V-A charakteristike fotovoltického panelu.

Pracovný bod

Tento bod sa nachádza na VA charakteristike FČ a ukazuje nám, pri akom napätí a prúde FČ aktuálne pracuje. Poloha pracovného bodu je závislá na veľkosti záťaže a taktiež teplote pri ktorej FČ pracuje. Z toho vyplýva, že sa tento bod snažíme umiestniť do bodu maximálneho výkonu (ďalší parameter). Jeho polohu určujú dva režimy:

- FČ pracuje do neznámej záťaže, teda polohu prac. bodu ovplyvňuje veľkosť záťaže.
- FČ pracuje ako nabíjačka batérii, teda polohu prac. bodu určuje nominálne napätie batérií.

MPP- bod maximálneho výkonu

Je to bod maximálneho výkonu. Udáva sa na výkonovej charakteristike v závislosti na napätí, ktorý sa nachádza na vrchole tejto charakteristiky. Z tohto dôvodu by malo zaťažovacie zariadenie zaťažovať FČ tak, aby sa jeho pracovný bod nachádzal na vrchole tejto charakteristiky alebo minimálne v jej okolí. Toto rieši algoritmus MPPT (maximal power point tracking), ktorý ovláda meniče napätia (týmto „blokom“ sa budeme venovať v nasledujúcich kapitolách).

Fill factor

Inak by sme mohli tento faktor nazvať ako elektrickou účinnosťou FČ. Udáva nám pomer medzi maximálnym výkonom a súčinom prúdu nakrátko a napätia naprázdno. V ideálnom prípade by sa mal blížiť k 1 avšak v reáli sa táto účinnosť pohybuje okolo 70%.

Účinnosť FČ

Parameter udávajúci účinnosť premeny slnečného žiarenia na elektrickú energiu. Je daný vlastnosťami materiálu, z ktorého je FČ vyrobený. Celoplošne však môžeme povedať, že účinnosť bez ohľadu na použitý materiál sa pohybuje od 15% do 20%.

Difúzna kapacita FČ, bariérová kapacita FČ

Tieto parametre priamo súvisia s parametrami diódy alebo teda PN prechodu ako takého. [1]

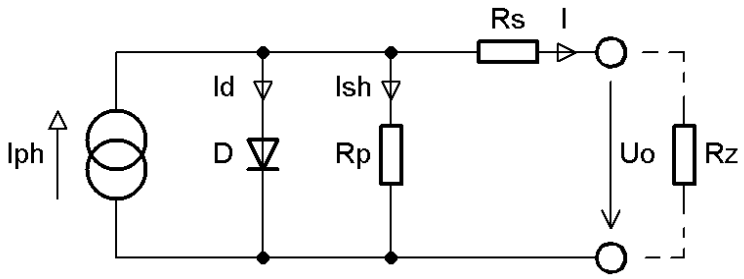
2.2.4 Náhradná schéma fotovoltaického článku

2.2.4.1 Exponenciálny model

Exponenciálny model fotovoltaického článok sa skladá zo zdroja prúdu, paralelnej diódy, paralelného rezistoru a sériového rezistoru.

Tento model z hľadiska simulácie je jednoduchší oproti dvojitému exponenciálnemu modelu z dôvodu jednoduchšej konfigurácií parametrov a charakteristík. Avšak čo sa týka presnosti simulácie prehliadnúc zložitosť konfigurácie je menej presný ako dvojitý exponenciálny model.

Zdroj prúdu Iph je priamo závislý na intenzite žiarenia dopadajúceho na FČ. Prúdy Id a Ish reprezentujú difúzny prúd internej diódy a prúdové straty v rezistore Rp.

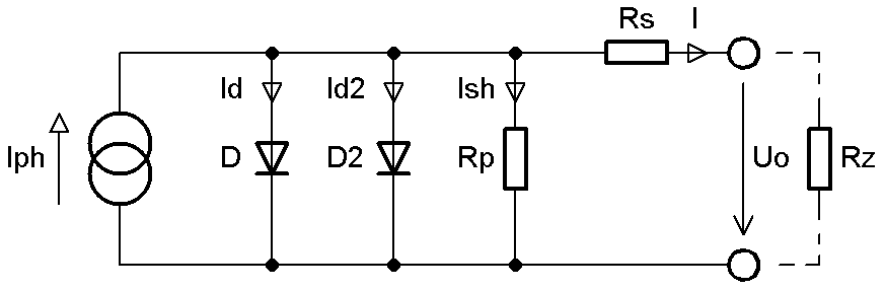


Obrázok 2

2.2.4.2 Dvojitý exponenciálny model

Dvojitý exponenciálny model fotovoltaického článok sa skladá zo zdroja prúdu, dvoch paralelných diód, paralelného rezistoru a sériového rezistoru. Tento model sa mi na základe simulácii a jej porovnávaní s reálnymi charakteristikami osvedčil najviac.

Zdroj prúdu Iph je priamo závislý na intenzite žiarenia dopadajúceho na FČ. Prúdy Id, Id2 a Ish reprezentujú difúzny prúd interných diód a prúdové straty v rezistore Rp.



Obrázok 3

2.2.5 Matematický model fotovoltaického článku

Jedná sa o analytický popis fotovoltaického panelu z hľadiska jeho funkčnosti a princípu.

2.2.5.1 Exponenciálny model

Matematický vzťah pre výpočet výstupného prúdu fotočlánku I vychádza z 1. Kirchhoffovho zákonu:

$$I = I_{ph} - I_d - I_{d2} - I_{sh} \quad (1)$$

kde I_{ph} je fotoprúd, I_d prúd tečúci diódou D, I_{d2} prúd tečúci diódou D2 a I_{sh} prúd tečúci rezistorom Rp. Pre prúd tečúci rezistorom Rp, ktorý vychádza z 2. Kirchhoffovho zákonu platí nasledovná rovnica:

$$I_{sh} = \frac{\mathrm{I} * R_s + U_0}{R_p} \quad (2)$$

kde R_s je sériový rezistor fotočlánku, ktorý udáva vnútorný odpor fotočlánku a je to v podstate kvalita fotočlánku. Čím nižší je jeho odpor, tým je fotopanel kvalitnejší. R_p je paralelný rezistor fotočlánku vyjadrujúci rozptylový prúd. Hodnota tohto rezistoru by sa mala naopak od hodnoty sériového rezistoru blížiť k nekonečnu. Pri veľmi nízkej hodnote tohto rezistoru môžeme hovoriť o poruche fotočlánku.

Rovnica pre svetlom generovaný prúd alebo fotoprúd:

$$I_{ph} = \left((T_{vs} - T_{ref}) * KI + I_{sc}\right) * IR \quad (3)$$

kde T_{vs} je teplota vnútornej štruktúry FČ, T_{ref} referenčná teplota, KI teplotný koeficient prúdu nakrátko, I_{sc} prúd nakrátko a IR intenzita žiarenia slnka v $kW*m^{-2}$.

Rovnica pre výpočet prúdu I_{d1} diódou D vychádza zo základného termálneho modelu pre diódy, teda Shockleyho rovnice:

$$I_d = I_{s1} * (e^{\frac{U_0 + I*R_s}{n_1 * U_t * PB}} - 1) \quad (4)$$

kde I_s je prúd v závernom smere diódy D, U_t teplotné napätie, PB počet sériovo zapojených buniek FV panelu, n_1 faktor ideálnosti diódy D. Tento faktor je závislý na technológií výroby použitých FČ a jeho hodnota sa pohybuje od 1 do 2, kde pri 1 hovoríme o ideálnej dióde (v reálnych podmienkach nedosiahnuteľné) a pri 2 o neideálnej dióde.

Ďalšou veľmi dôležitou rovnicou pri sumulácií charakteristík fotovoltaických panelov v závislosti na okolité podmienky je rovnica pre výpočet teplotného napätia:

$$U_t = \frac{\mathrm{K} * T_{vs}}{q} \quad (5)$$

Táto rovnica zahŕňa zmenu termálneho napätia v závislosti na zmene teploty vnútornej štruktúry, ktorá sa prejaví ako exponenciálna zmena pri výpočte prúdu v priepustnom smere diódy.

Záverný alebo saturačný prúd sa pohybuje v reálnych podmienkach v rádoch nA. Rovnica pre jeho výpočet:

$$I_{s1} = e^{(\frac{q*E_g}{K*n_1}*(\frac{1}{T_{ref}}-\frac{1}{T_{vs}}))} * I_{rs1} * (\frac{T_{vs}}{T_{ref}})^3 \quad (6)$$

kde q je náboj elektrónu, T_{vs} teplota vnútornej štruktúry FČ, T_{ref} referenčná teplota, K Boltzmannová konštanta, E_g energia zakázaného pásma použitého polovodiča vo FČ a I_{rs} prúd v závernom smere v závislosti na teplote vnútornej štruktúry, ktorý vypočítame podľa nasledovného vzťahu:

$$I_{rs1} = \frac{I_{sc}}{e^{\frac{q*U_{oc}}{n_1*T_{vs}*PB*K}} - 1)} \quad (7)$$

kde I_{sc} je prúd nakrátko a U_{oc} napätie naprázdno. Tieto parametre sú jedny z dôležitejších katalógových parametrov uvádzaných v datasheetoch výrobcov fotovoltaických panelov.

2.2.5.2 Dvojitý exponenciálny model

Tento model vychádza matematicky z modelu jednoduchého exponenciálneho modelu s tým rozdielom, že v tomto modeli sú pridané rovnice pre druhú paralelne zapojenú diódu. Všetky rovnice použité v exponenciálnom modeli sú použité aj v tomto modeli s tým, že sú pridané rovnice popisujúce charakteristiku druhej diódy D2.

Pre výpočet prúdu I_{d2} diódou D2, je rovnica totožná ako pre diódu D s tým rozdielom, že faktor ideálnosti diód sa môže líšiť:

$$I_{d2} = I_{s2} * (e^{\frac{U_0+I*R_s}{n_2*U_t*PB}} - 1) \quad (8)$$

kde n_2 je faktor ideálnosti diódy D2.

Rovnica pre výpočet saturačného záverného prúdu diódy D2:

$$I_{s2} = e^{(\frac{q*E_g}{K*n_2}*(\frac{1}{T_{ref}}-\frac{1}{T_{vs}}))} * I_{rs2} * (\frac{T_{vs}}{T_{ref}})^3 \quad (9)$$

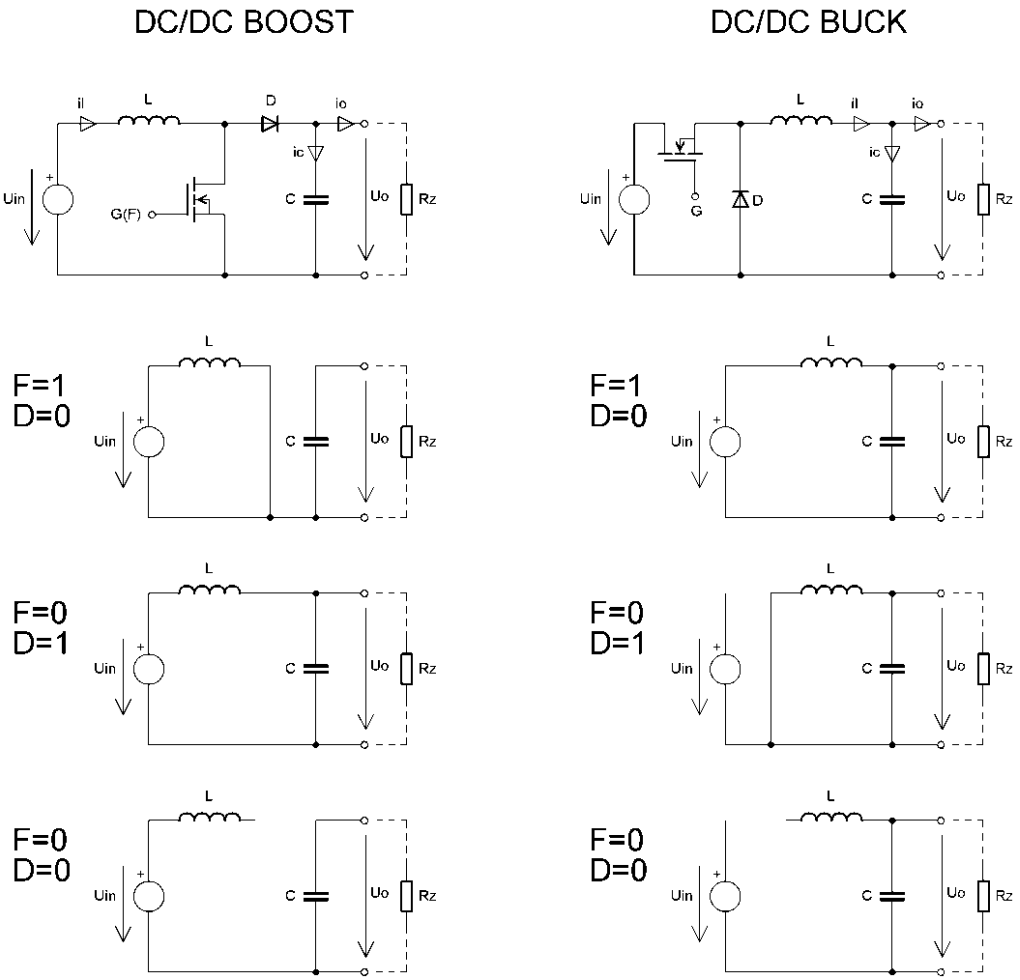
Rovnica pre výpočet saturačného záverného prúdu v závislosti na teplote vnútornej štruktúry diódy D2[2]:

$$I_{rs2} = \frac{I_{sc}}{e^{\frac{q*U_{oc}}{n_2*T_{vs}*PB*K}} - 1)} \tag{10}$$

2.3 DC-DC meniče

DC-DC menič je obecne akýkoľvek obvod, který zvyšuje alebo znižuje veľkosť výstupného napätia voči vstupnému. Tieto meniče sa dnes používajú takmer vo všetkej spotrebnej elektronike, nakoľko sú lacné, majú vysokú účinnosť a sú ľahké.
Tieto meniče pracujú na niekoľkých princípoch, no tým hlavným princípom v súčastnosti využívaným je tzv. elektromagnetický, kde sa uchováva energia v cievke. V obvodech kde sa induknosť nepoužíva, dochádza k násobeniu napätí pomocou kondenzátorov. Nakoľko my budeme dodávať vysoký výstupný prúd do výstupnej záťaže budeme využívať len obvody s indukčnosťou, nakoľko obvody so sériovo radenými kondenzátormi nie sú schopné dodať velký výstupný prúd. Základné rozdelenie DC-DC meničov je teda DC menič zvyšujúci výstupné napätie alebo boost menič a DC menič znižujúci napätie alebo buck menič. Na následujúcom obrázku (Obrázok 4) sú zobrazené schémy zapojení oboch meničov spolu s ich stavmi zopnutí alebo rozopnutí výkonového spínača (v tomto prípade MosFet) a diódy.

Najvhodnejším spínacím prvkom je IGBT tranzistor alebo modul, ktorý je z hradiska elektrických parametrov, najvhodnejšia voľba. Taktiež je možné použiť aj tranzistory MosFet alebo klasické výkonové bipolárne tranzistory s vysokou f_t, kde však vzniká problém s ich budením, ktoré má modul IGBT vyriešené s budiacím MosFet tranzistorom.



Obrázok 4

Z tohto obrázku budeme vychádzať pri popisovaní funkčnosti a dejov jednotlivých meničov.

2.3.1 DC-DC boost menič

Boost menič teda zvyšujúci menič. Najčastejšie používaný menič v solárnej technike.

Vychádzame zo stavov na Obrázku 4. Prvý stav, teda zopnutý spínač (MosFet) a dióda v závernom smere (D=0). Po jeho dobu zopnutia dochádza k vybíjaniu kondenzátoru C do pripojenej záťaže Rz. Aby nedochádzalo k vybíjaniu cez zopnutý spínač je v obvode dióda D, ktorá je v závernom režime a teda nepreteká ňou prúd a tým pádom sa prúd kondenzátora C nevybíja cez zopnutý spínač. Zo zdroja Uin tečie prúd cez cievku L a zopnutý spínač späť k zápornému pólu zdroja. Takto dochádza k akumulácií energie v magnetickom poli cievky. Tento prúd rastie až dovtedy, dokedy sa spínač nerozopne a nedostaneme sa do druhého stavu, teda rozopnutý spínač a dióda v priepustnom režime. Po rozopnutí si chce indukčnosť udržať prúd, ktorý ňou tiekol a z tohoto dôvodu na nej vzniká indukované napätie. Toto naindukované napätie sa sčíta

s napätím zdroja Uin a týmto súčtom napätia nabíja kondenzátor C a dodáva do neho celkový prúd, který tečie do záťaže Rz.

Veľkosť indukovaného napätia je závislá na perióde spínania spínača a takisto na vlastnej indukčnosti cievky. V závislosti na týchto faktoroch môže napätie nadobúdať rôzne hodnoty, no vždy bude veľkosť výstupného napätia vyššia ako veľkosť napätia vstupného, nakoľko hodnota indukovaného napätia na cievke je vždy väčšia ako 0V.

Výpočty na výpočet daných hodnôt C, L a Rz, pre nami zvolený konkrétny typ fotovoltaického panelu sa budú nachádzať ďalej v časti simulácií.

2.3.2 DC-DC buck menič

DC-DC buck menič, teda menič znižujúci výstupné napätie voči vstupu. Vo fotovoltaike sa používa najčastejšie ako zdroj pre dobíjanie bateriek, teda len na zásobenie energie v batériách.

Zapojenie je v podstate totožné s boost meničom s tým rozdielom, že hlavný spínač je zapojený do série a dióda D naopak paralelne.

Taktiež budeme vychádzať zo stavov na Obrázku 4. Prvý stav, teda zopnutý spínač (MosFet) a dióda v závernom smere (D=0). Dochádza k nárastu výstupného napätia a to tak, že pokiaľ je veľkosť kapacity C a indukčnosť cievky L veľká, nabíjanie trvá dlhšiu dobu. V tomto stave sa akumuluje energia v cievke L. Pokiaľ dojdeme do druhého stavu, teda rozopnutiu spínaču a dióda D bude v pripustnom smere (D=1), v tomto prípade sa cievka L snaží, aby smer a veľkosť púdu bola stále rovnaká. Energia naakumulovaná na cievke L v prvom stave sa mení na prúd, ktorá dobíja kondenzátor C. Dióda D plní funkčnosť uzavretia obvodu toku prúdu medzi cievkou L a kondenzátorom C. Z tohto vyplíva, že pri rozopnutom spínači dochádza k zvyšovaniu výstupného napätia z dôvodu indukcie napätie na cievke L, kdežto při zopnutom spínači napätie klesá. Z tohto ďalej vyplíva, že pri väčšej frekvencii spínania je napätie na výstupe o toľko menšie okoľko je už spomínaná frekvencia väčšia. [4]

2.4 DC-AC meniče

Úlohou DC-AC meniča je transformácia vstupného jednosmerného napätia z DC-DC meniča na výstupné striedavé napätie. V našom prípade sa jedná o klasické sieťové napätie 230VAC/50Hz.

Rozdelenie DC-AC meničov:

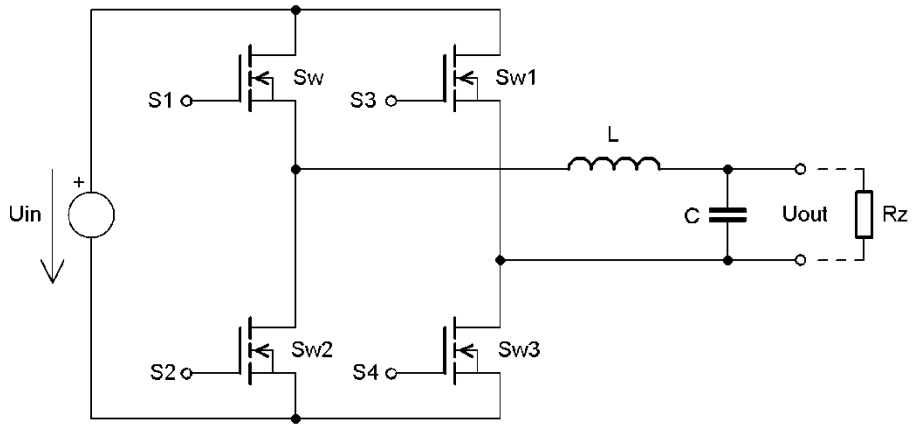
- S polovičným mostíkom (half bridge)
- S plným mostíkom (full bridge)

Rozdiely medzi týmito dvoma mostíkmi sú len v náročnosti a zaťažiteľnosti. U polovičného mostíka je výhodou jednoduchosť riadenia, kde riadíme len 2 výkonové prvky (IGBT, MosFet), kdežto u plného mostíka až 4 avšak čo sa týky zaťažiteľnosti, znesie plný mostík až 4 násobný výkon spínania s rovnakými výkonovými prvkami.

Nakoľko v našej elektrárni so zakladnými panelmi od firmy ReneSola, ktoré majú maximálny výkon pri intenzite žiarenia 1000W/m^2 až 250W budeme testovať aj ich sériové a paralelné zapojenia, kde polovičné mostíky znesú výkon s dvoma výkonnými IGBT modulmi len 400W. Z tohoto dôvodu sa budeme venovať len simulácií meniča s plným mostíkom, nakoľko iné výhody resp. nevýhody neponúkajú.

2.4.1 DC-AC menič s plným "H" mostíkom

Hlavným prvkom DC-AC meniča je mostík, ktorý je zložený zo 4 výkonových tranzistorov MosFet (na schéme Sw-Sw3). Tieto tranzistory sú riadené pomocou impulzne šírkovej modulácie PWM (so sínusovou moduláciou). Jeho schéma sa nachádza na Obrázku 5. Za týmto mostíkom je LC filter a záťaž R_z.



Obrázok 5

2.4.1.1 "H" mostík

Existujú 4 rôzne polohy spínačov plného mostíka, ktoré môžu byť použité k získaniu napätia na záťaži. Tieto polohy sú uvedené v nasledujúcej tabuľke Tabuľka 1. Ako vidno, zvyšné možnosti sú vynechané, nakoľko by mohol vzniknúť skrat a sú v tomto cykli nepotrebné.

Poloha MosFet spínačov (logicky)				Napätie na záťaži
Sw	Sw1	Sw2	Sw3	
1	0	0	1	Kladná polvlna napätia
0	1	1	0	Záporná polvlna napätia
1	1	0	0	Nulový potenciál
0	0	1	1	Nulový potenciál

Tabuľka 1 [5]

V mostíku je možné použiť akékoľvek rýchle spínacie prvky, treba ich však vyberať s ohľadom na spínaný výkon, veľkosť spínaného napätia a prúdu. Najideálnejším spínacím prvkom je IGBT tranzistor (modul), ktorý zahŕňa všetky výkonové polovodičové komponenty ako aj potrebné budiace a ochranné obvody. Taktiež použitie IGBT modulov je výhodné aj z hľadiska veľmi dobrých elektrických parametrov a vysokej spoľahlivosti.

2.4.1.2 LC filter

LC filter slúži na filtráciu šírkovo modulovaného signálu z H mostíku. Tento Filter je tvorený výkonovými tlmivkami a kondenzátormi.

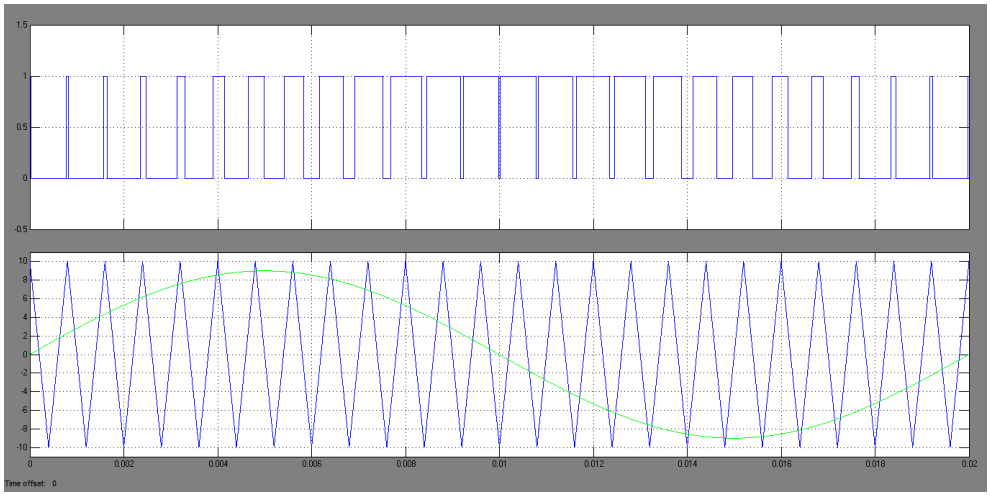
Na tejto pozícií je možná samozrejme rôzna kombinácia L a C prvkov v závislosti na potrebe nízkosti THD, avšak jednoduchý LC filter je pre potreby klasickej distribučnej siete úplne postačujúci.

2.4.1.3 PWM riadenie

Riadenie spínania výkonových prvkov v mostíku sa môže prevádzať buď analógovo (v dnešnej dobe zastarané), digitálne pomocou mikroprocesorov alebo priamo obvodmi určenými na PWM.

Pri analógovom riadení je potrebné generovať oba signály, teda referenčný a nosný signál, z ktorých komparátor vytvorí výsledný výstupný šírkovo modulovaný obdĺžnikový signál. Referenčný signál je sínus o frekvencii požadovanej na výstupe mostíku, nosný signál je buď píla alebo trojuholník s frekvenciou niekoľkonásobnou voči referenčnému signálu.

Na Obrázku 6 sa nachádzajú všetky spomenuté signály. V spodnom grafe je jedna perióda referenčného sínusového signálu o frekvencii 50Hz zobrazeného zelenou farbou, na ňom priložený nosný pílovitý signál s 25 násobnou frekvenciou voči referenčnému signálu. Táto frekvencia je teda samotná frekvencia PWM, akou budú spínané tranzistory. Na vrchnom grafe je zobrazený výstupný šírkovo modulovaný obdĺžnikový signál. [5]



Obrázok 6

2.5 MPPT- algoritmus prenosu maximálneho výkonu z FV panelu

Na hľadanie MP bodu poznáme viaceré algoritmy. Základnými aspektmi pri výbere vhodného algoritmu je schopnosť detekcie viacerých maxím výkonovej charakteristiky, náklady a rýchlosť konvergencie.

Úroveň slnečného žiarenia má tendenciu sa na rôznych miestach panelu meniť, resp. úroveň žiarenia nemusí byť rovnaká na všetkých paneloch naraz. Preto vzniká viacej lokálnych bodov maxím v jednom systéme. Účinnosť a zložitosť algoritmu určuje či sa počíta skutočný bod maximálneho výkonu, alebo len lokálne maximum výkonu. V poslednom uvedenom prípade sa maximálny elektrický výkon nezískava zo solárneho panelu.

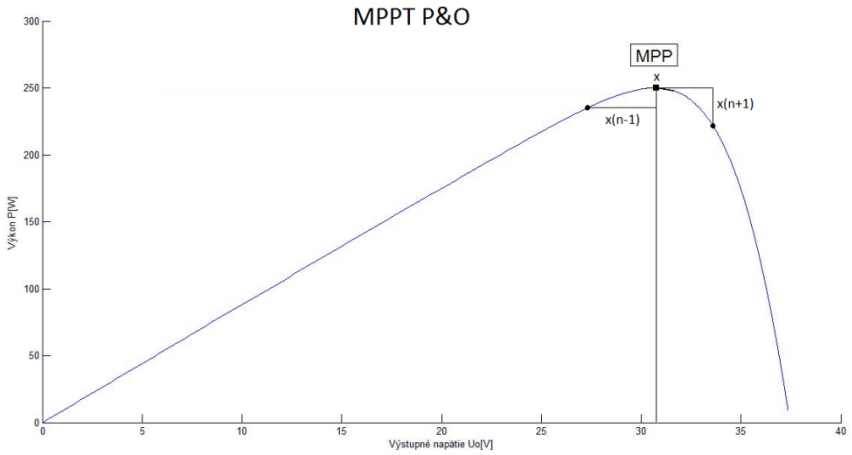
Čím výkonnejší algoritmus MPPT, tým je čas konvergencie, teda hľadania prevádzkového napätia alebo prúdu, nižší. V závislosti aký má byť čas tejto konvergencie systém vyžaduje od algoritmu požadované schopnosti.

V tejto práci si povieme o dvoch základných algoritmoch:
Perturbation and Observation
Incremental Conductance

2.5.1 Perturbation and Observation

Koncepcia tohto algoritmu spočíva v zmene napätia alebo prúdu fotovoltaického panelu dovtedy, dokedy nezíska z neho maximálny odoberaný výkon. Akonáhle sa zvýši napätie na paneli zvyšuje výkon panelu, systém pokračuje zvyšovaním prevádzkového napätia dovtedy, dokedy nezačne výstupný výkon klesať. Pokiaľ sa to

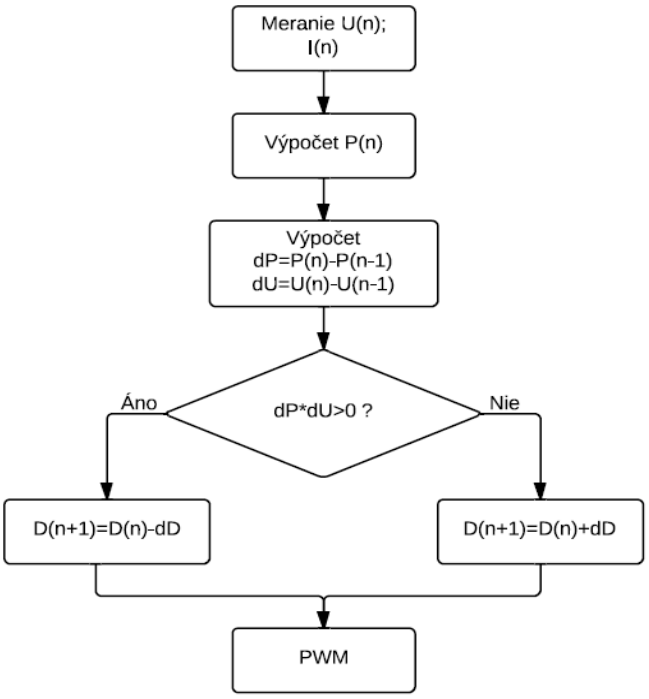
stane, napätie sa znižuje a snaží sa dostať späť do bodu maximálneho výkonu. Tento cyklus pokračuje donekonečna.



Obrázok 7

Hodnota výkonu osciluje stále okolo bodu MPP, ale nikdy sa nestabilizuje. Toto je aj hlavnou nevýhodou algoritmu P&O. Ak bude zmena ožiarenia alebo záťaže rapídna, môže algoritmus sledovať bod MPP v zlom smere. Hlavnou výhodou algoritmu P&O je však jeho jednoduchosť a ľahkosť implementácie.

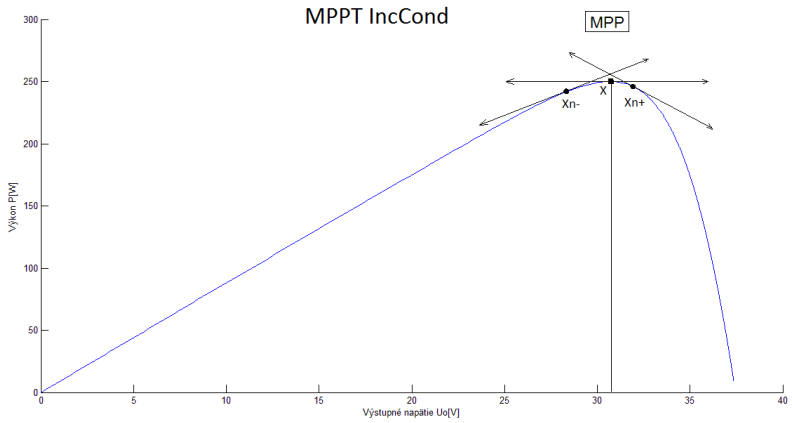
Diagram (Obrázok 8) znázorňujúci presný spôsob funkcie P&O algoritmu hore popísaného slovného postupu. Z tohto diagramu



Obrázok 8

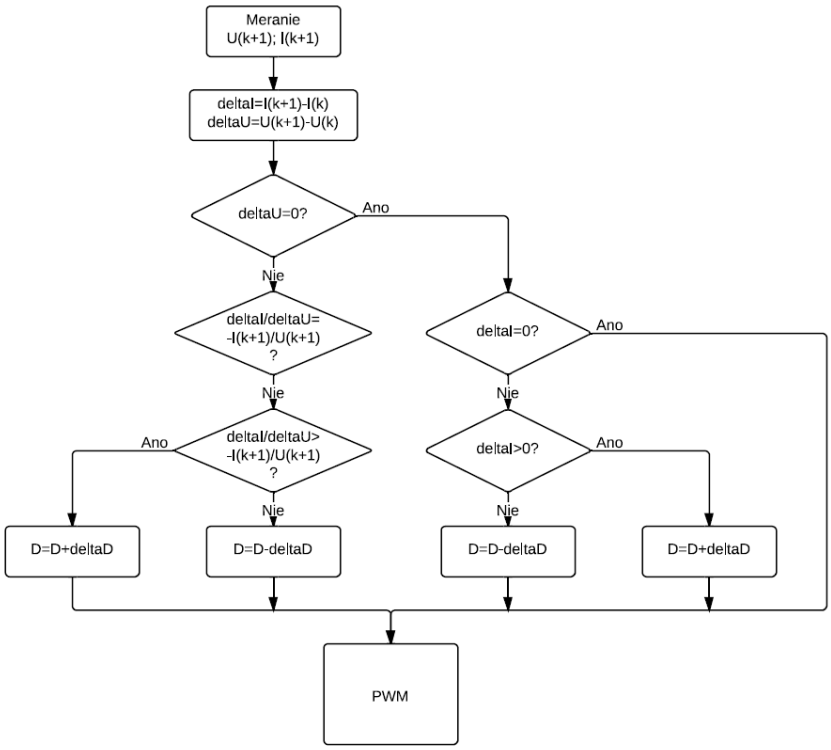
2.5.2 Incremental Conductance

Incremental Conductance algoritmus je založený na pozorovaní sklonu krivky položeného na aktuálnom sledovanom bode výkonovej krivky. Pokiaľ je krivka preložená bodom maximálneho výkonu, sklon je nulový, pokiaľ sa krivka nachádza naľavo od bodu MPP sklon je kladný a pokiaľ napravo od bodu MPP sklon je záporný. Bod MPP sa zistí porovnaním okamžitej vodivosti (I/U) na kumulatívnej vodivosti (ΔI/ΔV). Akonáhle algoritmus nájde MPP, systém si udržuje tento bod výkonu okrem zmeny napätia alebo prúdu. V tomto prípade si bod nájde nový bod MPP.



Obrázok 9

Táto technika má výhodu v tom, že môže dosiahnuť a udržiavať MPP bez straty účinnosti, nakoľko neosciluje okolo tohto bodu ako v prípade P&O. Takisto aj za rýchlo meniacich sa podmienok sleduje presnejšie tento algoritmus. Medzi hlavnú nevýhodu patrí jej dlhší čas na ustálenie sa MPP. [9]


Meranie
U(k+1); I(k+1)
deltaI=I(k+1)-I(k)
deltaU=U(k+1)-U(k)
deltaU=0?
Ano
Nie
deltaI/deltaU=
-I(k+1)/U(k+1)
?
deltaI=0?
Ano
Nie
Nie
Ano
deltaI/deltaU>
-I(k+1)/U(k+1)
?
deltaI>0?
Ano
Nie
Nie
D=D+deltaD
D=D-deltaD
D=D-deltaD
D=D+deltaD
PWM

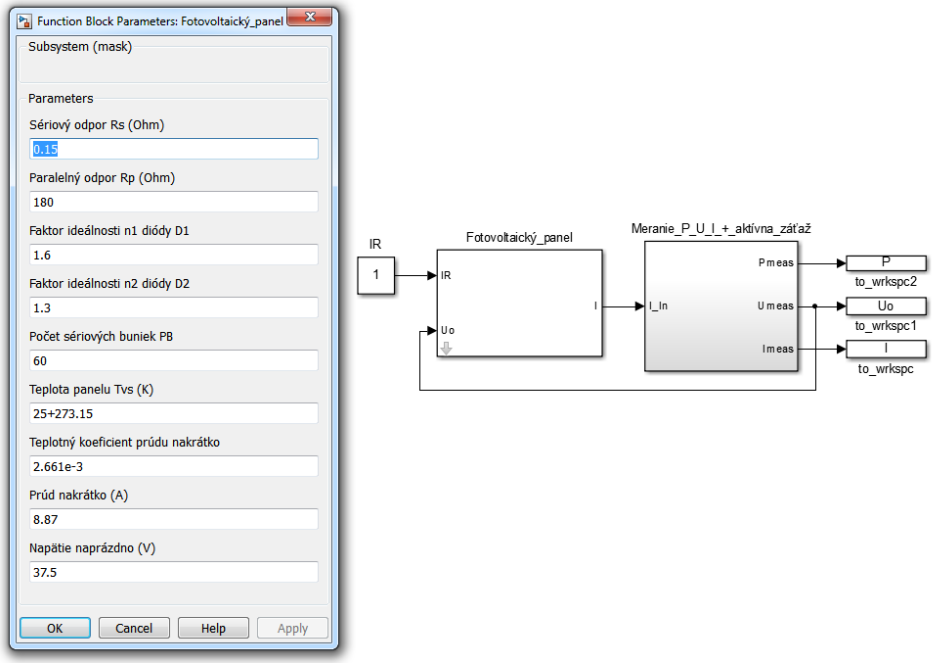
Obrázok 10

3 MODELOVANIE ČASTÍ SOLÁRNEJ ELEKTRÁRNE

3.1 Fotovoltaický panel

Jedná sa o presnú interpretáciu matematického dvojitého exponenciálneho modelu v prostredí Simulink. Na Obrázku 11 vidíme kompletný model fotovoltaického panelu s meracími prístrojmi, pre vyhodnocovanie charakteristík daného panelu.

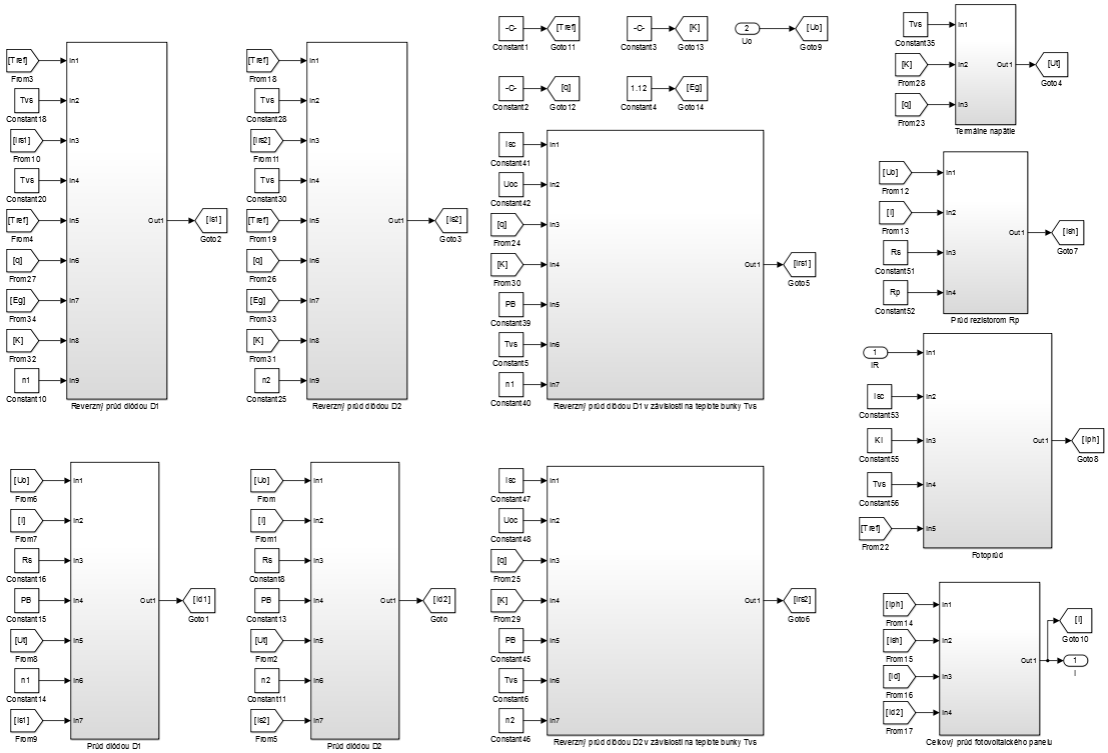
Ďalej tu môžeme vidieť okno pre nastavenie všetkých konštánt fotovoltaického panelu, kde môžeme meniť hodnoty odporov (sériového aj paralelného) v Ohmoch, faktory ideálností oboch diód, počet vnútorných fotovoltaických článkov zapojených do série v paneli, teplotu vnútornej štruktúry PN prechodu v Kelvinoch, teplotný koeficient prúdu nakrátko, prúd nakrátko a napätie naprázdno. Všetky zvyšné konštanty ako Boltzmannová konštanta, náboj elektrónu a referenčná konštanta sú uložené vo vnútornej štrukture fotovoltaického panelu. Pomocou skriptu sa spúšťa simulácia a vykreslujú sa základné charakteristiky.



Obrázok 11

Do tohto modelu nám vstupuje jeden parameter a to je intenzita žiarenia. Výstup z bloku je prúd, meraný prúdovým a napäťovým senzorom, ktorých hodnoty posielame ako vektor do workspacu Matlabu. K týmto blokom je pripojená premenlivá záťaž Rz, ktorej bežec je ovládaný funkciou ramp, ktorá zvyšuje svoju hodnotu v závislosti na čase a teda priamoúmerne zvyšuje odpor záťaže podľa času. Všetky tieto bloky sú uložené v subsystéme kvôli prehladnosti modelu.

V bloku Fotovoltaický panel uloženého v maske zloženého zo 60 fotočlánkov sa nachádzajú všetky matematické rovnice spájané do ucelených blokov (subsystémov) interpretujúce každú matematickú rovnicu zvlášť. Pohľad do vnútornej štruktúry nájdete na Obrázku 12.



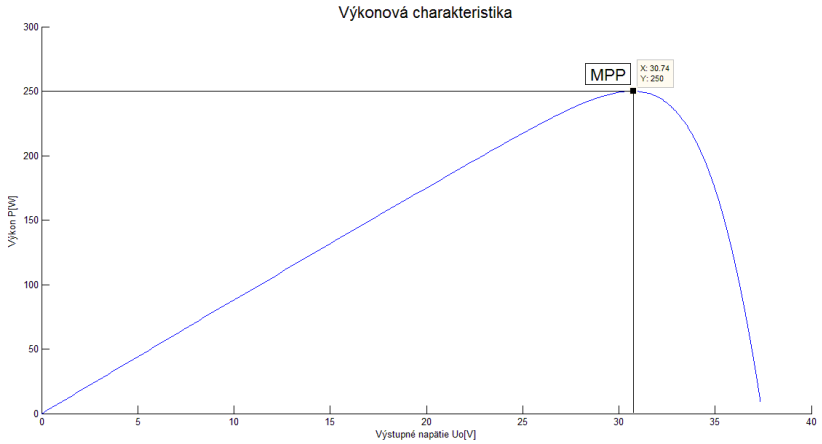
Obrázok 12

3.1.1 Simulácia charakteristík reálneho fotovoltaického panelu ReneSola JC250S

Vychádzali sme z katalógových parametrov, teda napätia naprázdno U_{oc}=37,5V, prúdu nakrátko I_{sc}=8.87A a teplotných koeficientov.

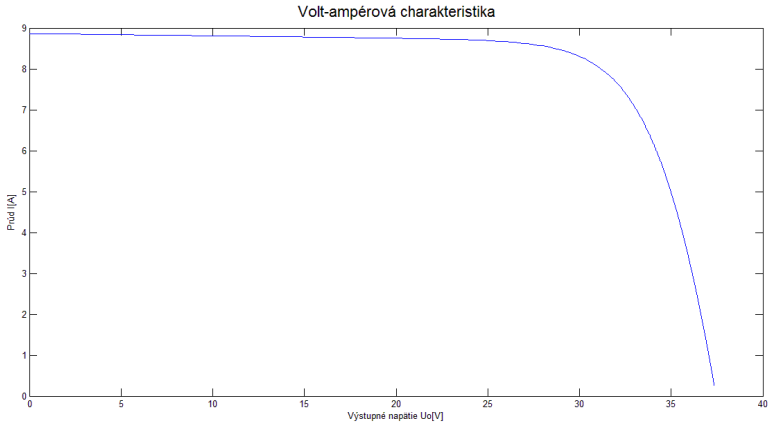
3.1.1.1 Základné charakteristiky

Na Obrázku 13 sa nachádza výkonová charakteristika a na obrázku Obrázku 14 V-A charakteristika daného fotopanelu.



Obrázok 13

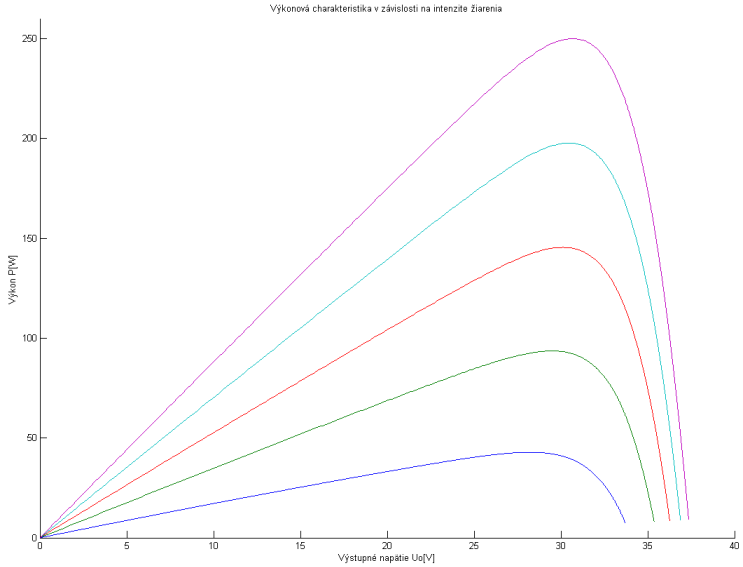
Na výkonovej charakteristike je zobrazený bod MPP-maximálneho výkonu, maximálny výkon a napätie pri tomto bode.



Obrázok 14

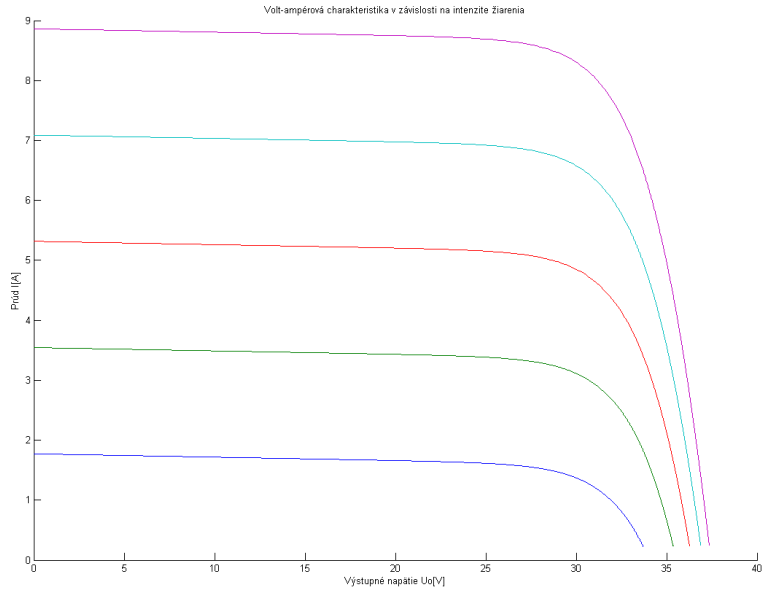
3.1.1.2 Charakteristiky v závislosti na intenzite žiarenia

Ďalší model slúži na vykreslovanie charakteristík v závislosti na intenzite žiarenia. Jedná sa v podstate o päť základných modelov s tým, že každý má na vstupe rôzne žiarenie. Na Obrázku 15 sa nachádzajú výkonové charakteristiky a na Obrázku 16 V-A charakteristiky.



Obrázok 15

Na oboch charakteristikách môžeme pozorovať znižovanie či už prúdu alebo napätia, toto však nie je také rapídne ako znižovanie prúdu a z toho vyplývajúceho výkonu.

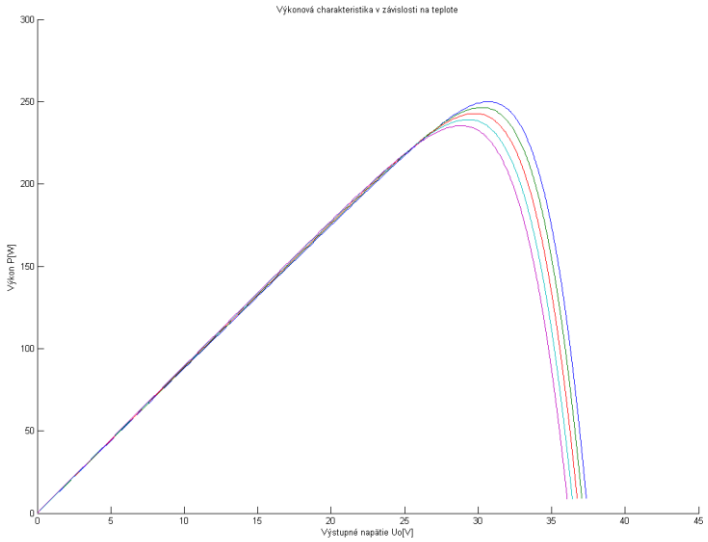


Obrázok 16

Oba grafy charakteristík sa vzťahujú pre intenzity žiarenia od 1kW/m^2 do 200W/m^2 s krokom 200W/m^2 (od fialovej až po modrú krivku). Z toho môžeme uviesť záver, že výkon resp. hodnota MPP priamoúmerné klesá so snižujúcou sa intenzitou žiarenia.

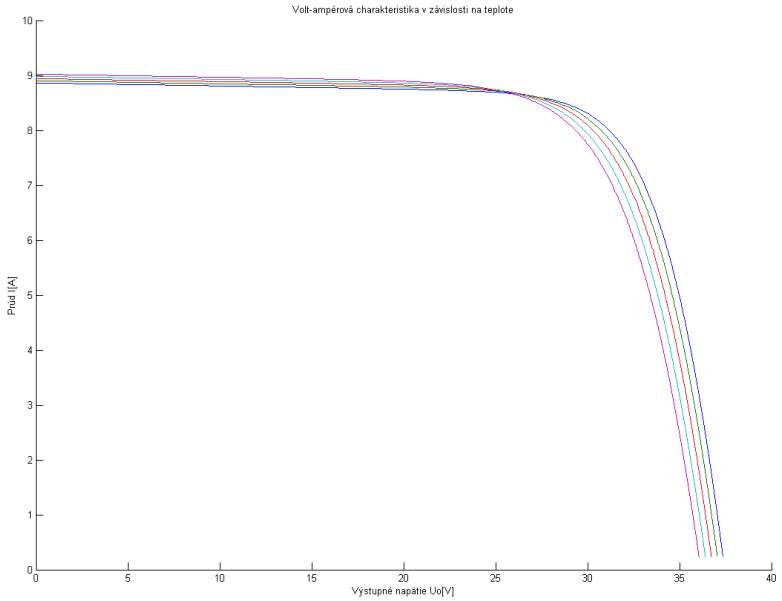
3.1.1.3 Charakteristiky v závislosti na teplote FV panelu

Ďalší z modelov je model v závislosti na teplote FV panelu, ktorý ako model predchádzajúci sa skladá z 5 základných modelov s tým, že každý má nastavené rôzne teploty vnútorných štruktúr. Na Obrázku 17 sa nachádzajú výkonové charakteristiky a na Obrázku 18 V-A charakteristiky.



Obrázok 17

Na týchto charakteristikách môžeme pozorovať mierny úpadok výkonu v závislosti na zvyšujúcej sa teplote FV panelu (graf výkonových charakteristík). Na grafe VA charakteristik zase môžeme pozorovať mierne zvýšenie prúdu (do cca 25V) a následne od tejto hranice znižovanie napätia a teda aj napätia naprázdno. Toto v konečnom dôsledku spôsobí už spomenuté viditeľné zníženie celkového výkonu.



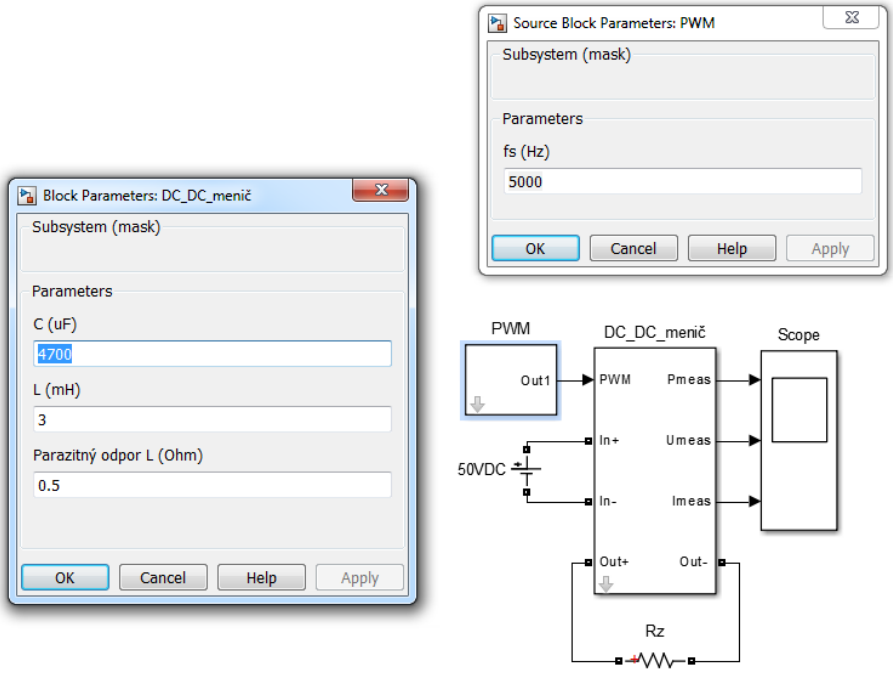
Obrázok 18

Oba grafy charakteristík sa vťahujú pre teploty od 25°C do 85°C s krokom 15°C (od modrej krivky až po fialovú). Z tejto simulácie môžeme uviesť záver, že celkový výkon MPP s narastajúcou teplotou klesá.

3.2 DC-DC boost menič

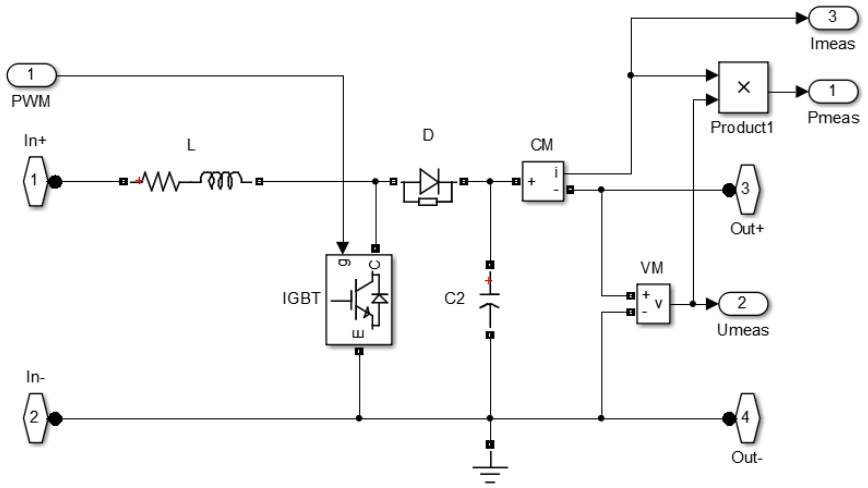
Model simulovaného DC-DC boost meniča sa nachádza na Obrázku 19. Môžeme na ňom vidieť samotný DC-DC menič, ktorého vnútorné parametre môžeme meniť dvojklikom na jeho model. Jedná sa o základné parametre, indukčnosť cievky L s jej parazitným odporom a kapacitu kondenzátoru C.

Vstupom je jednosmerný zdroj napätia, nastavený na hodnotu 50V. Vstup PWM je vstupom spínacieho prvku, v tomto prípade IGBT, kde privádzame signál pulzne šírkovej modulácie PWM. Dvojklikom na tento blok nastavujeme spínaciu frekvenciu a vstupnou konštantou striedu PWM signálu. Ďalej sa na bloku DC-DC meniča nachádzajú výstupy Out+ a Out- slúžia ako výstupné svorky meniča, na ktoré je pripojená záťaž R_z. Ďalšie výstupy slúžia na overenie veľkosti napätia na záťaži, prúd pretekajúci touto záťažou a následne z týchto dvoch údajov vypočítaný výkon. Všetky tieto výstupy sú pripojené na 3 kanálový osciloskop, ktorého priebehy sú zobrazené na Obrázku 21.



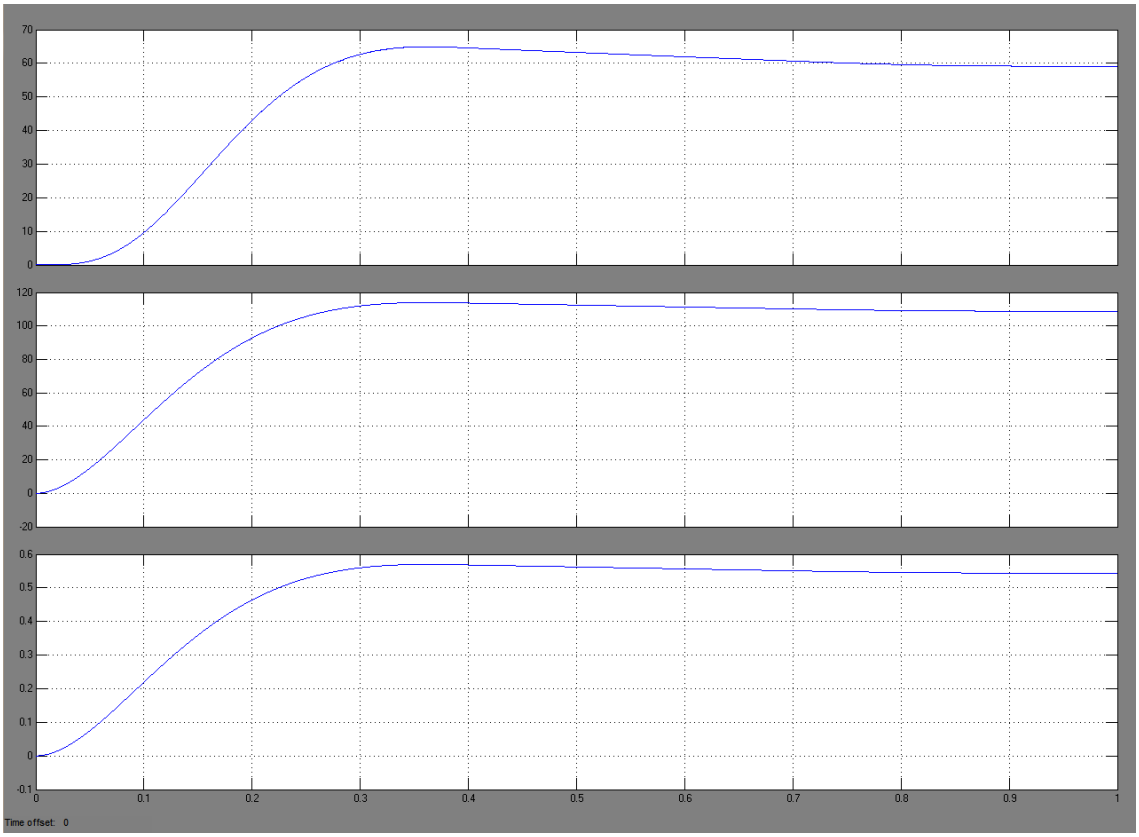
Obrázok 19

Pohľad na vnútornú štruktúru meniča sa nachádza na Obrázku 20. Jednotlivé bloky sú využité z knižnice SimPowerSystems.



Obrázok 20

Na výstupe z meniča po ustálení dynamického deju je jednosmerné napätie cca 113V. Toto môžeme vidieť na Obrázku 21, nábeh meniča a následné ustálenie napätia na požadovanú hodnotu. Pri priblížení môžeme by sme taktiež mohli pozorovať mierne zvlenenie ustáleného napätia, ktoré je zanedbateľné z dôvodu vyšších hodnôt cievky L a kondenzátoru C2, ktoré napomohli k dokonalejšiemu vyfiltrovaniu výstupného napätia.



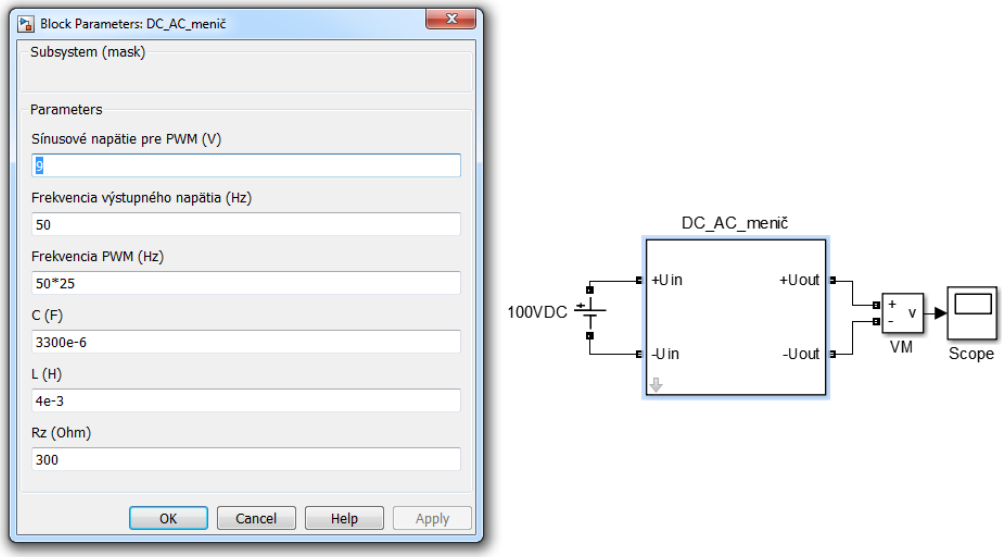
Obrázok 21

Z hora na dol výkon P, výstupné napätie U na záťaži R_z a prúd I záťažou R_z v závislosti na čase (s). Zvislé osi sú v uvedené v základných jednotkách SI teda W, V a A.

3.3 DC-AC menič s plným „H“ mostíkom

Ďalším simulovaným modelom je DC-AC menič s plným „H“ mostíkom. Tento model môžeme vidieť na Obrázku 19. Takisto ako prechádzajúce modely je aj tento model umiestnený v maske, ktorá sa nakonfiguruje podľa požiadavkou a následne užívateľ už len dvojklikom na blok meniča nastavuje parametre vo vnútornej štruktúre.

Do modelu vstupuje jednosmerné napätie do svoriek +Uin a –Uin, na výstupné svorky je pripojený voltmeter s osciloskopom.

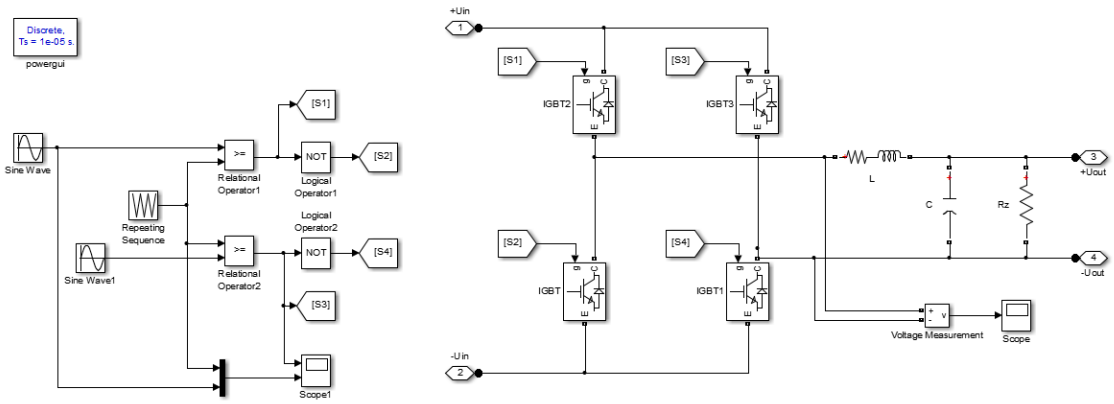


Obrázok 22

Na Obrázku 20 je pohľad do vnútornej štruktúry meniča. Výkonové prvky s LC filtrom a záťažou sú použité z knihovny SimPowerSystems.

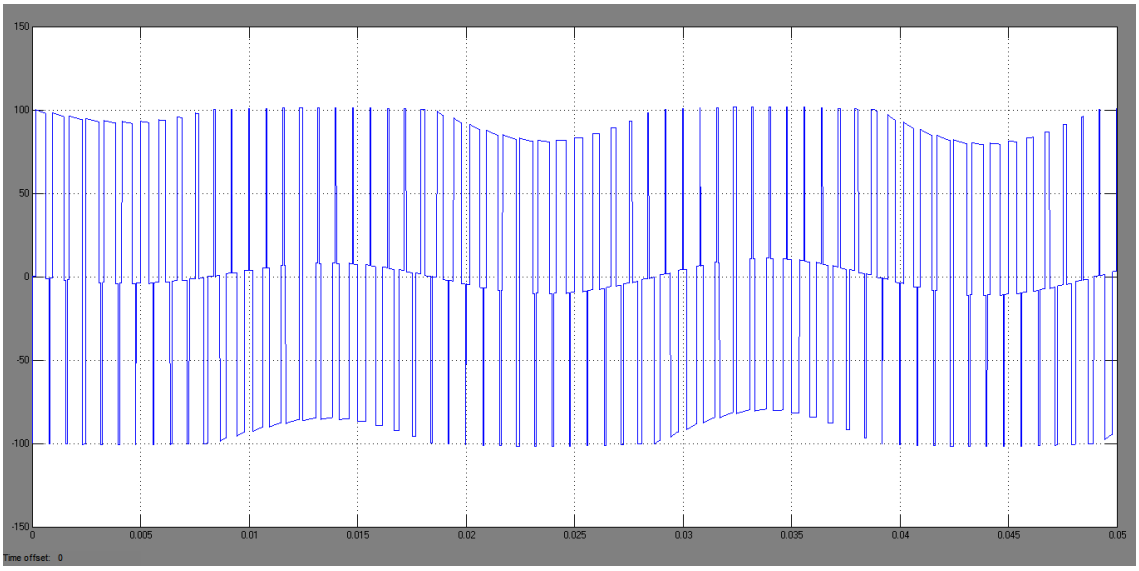
Na ľavej strane sa nachádza riadenie H mostíku, ktorý je na pravej strane obrázku. Riadenie je tvorené z dvoch generátorov referenčného sínusového napätia, ktoré je modulované na pílovité napätie.

H mostík je tvorený zo 4 IGBT tranzistorov (modulov), za ktorými sa nachádza LC filter so zaťažovacím odporom Rz.



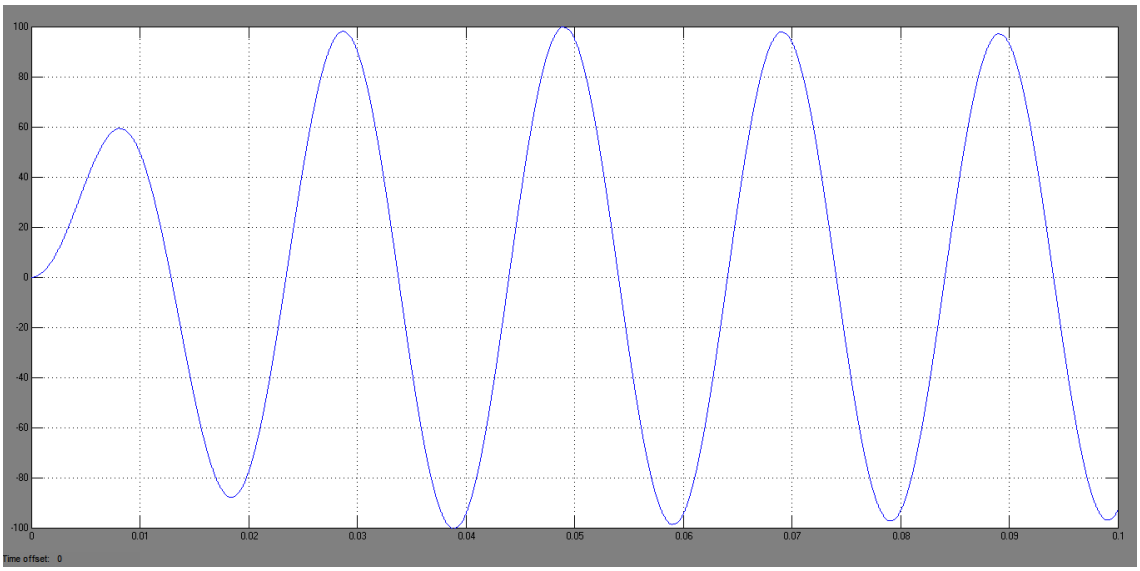
Obrázok 23

Pre názornosť meriame napätie aj pred LC filtrom, kde môžeme vidieť surové šírkovo modulované napätie. Jeho mierne zvlnenie pravdepodobne spôsobujú parazitné parametre IGBT tranzistorov. Priebeh šírkovo modulovaného napätia je na Obrázku 21.



Obrázok 24

Vyfiltrované napätie za LC filtrom je merané na svorkách +Uout a –Uout (Obrázok 19), kde môžeme vidieť taktiež prechodový dej nábehu už vyfiltrovaného sínusového napätia o frekvencii 50Hz viď. Obrázok 22.

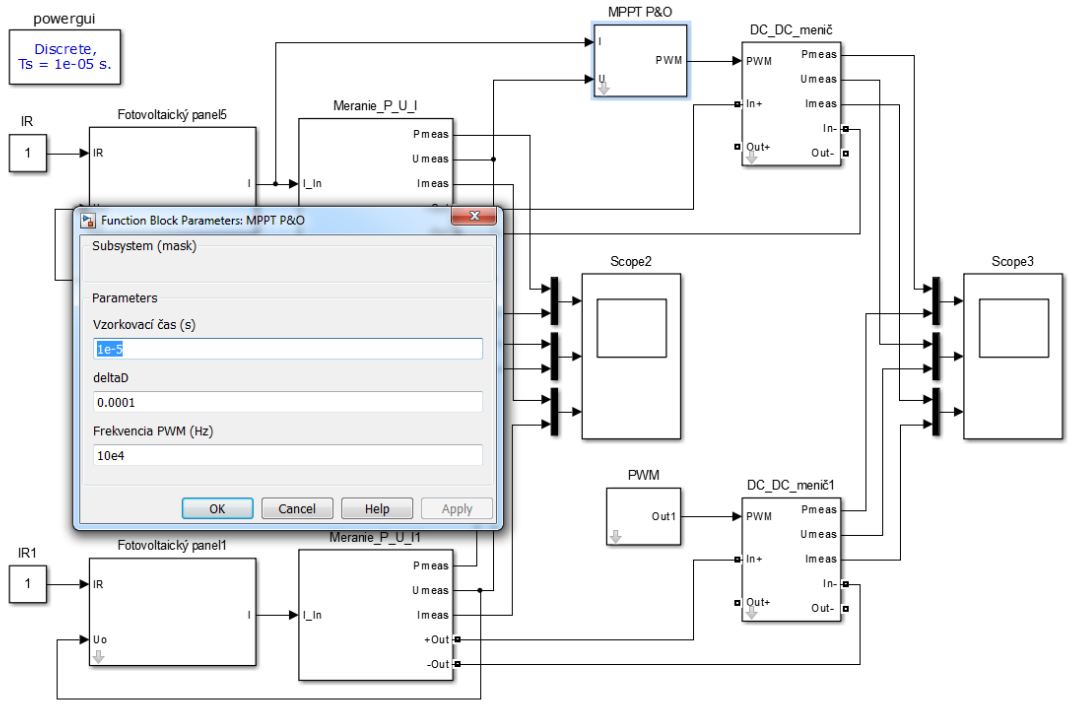


Obrázok 25

3.4 MPPT Perturbation and Observation

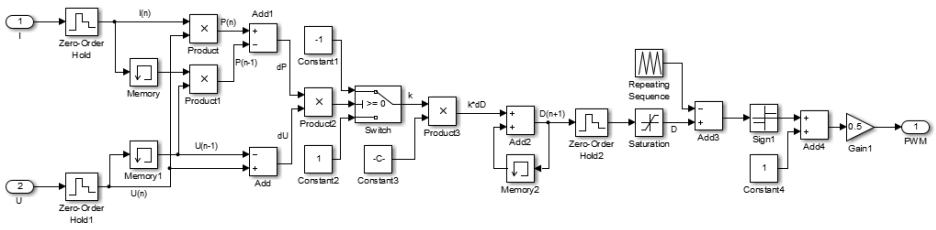
Teóriu k MPPT sme si prebrali v predchádzajúcej časti, prejdem teda priamo k jej simulácií.

Na Obrázku 26 môžeme vidieť model v podstate s dvoma fotovoltaickými elektrárňami, kde pri jednej je DC_DC menič riadený MPPT algoritmom a druhý len obyčajnou pulze šírkovou moduláciou. Tento model som navrhol z dôvodu názorného ukázania dôležitosti/potrebnosti MPPT riadenia. Na tomto obrázku taktiež môžeme vidieť okno s možnosťami nastavení MPPT. Vplyv a možnosť nastavení si preberieme následne pri samotnom popise MPPT algoritmu.



Obrázok 26

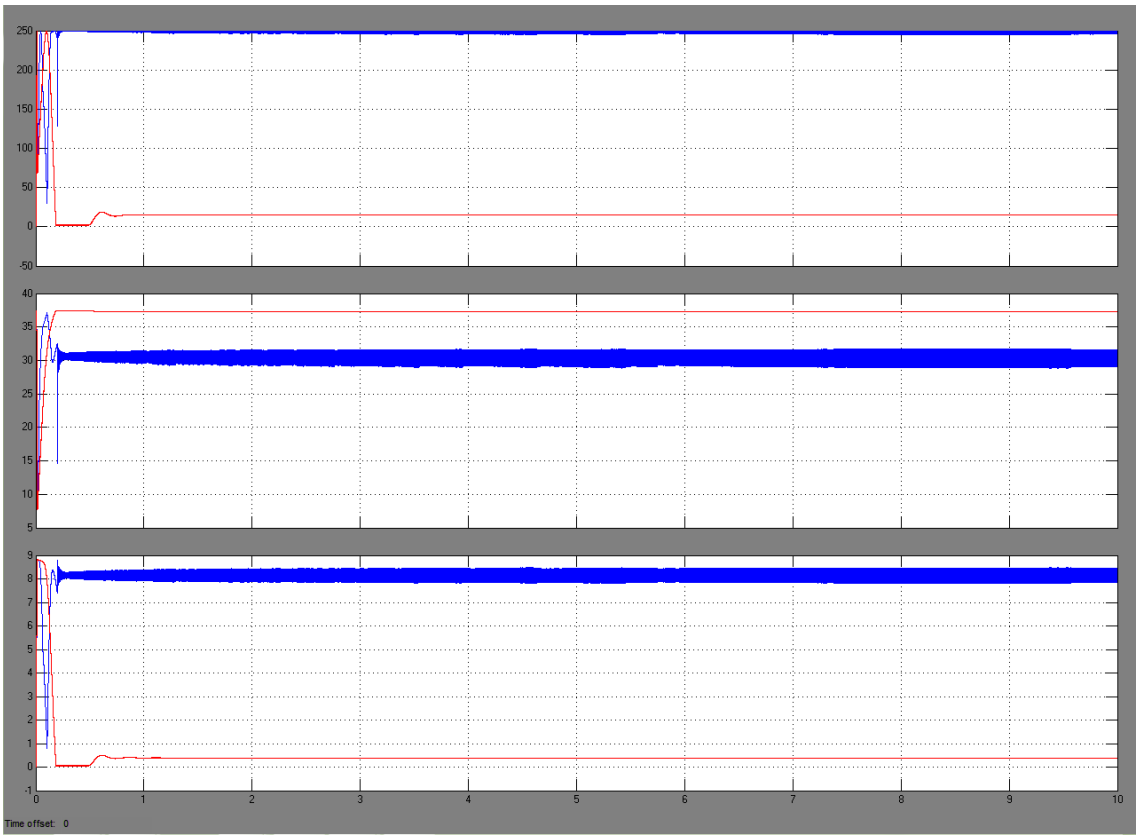
Pri návrhu MPPT P&O algoritmu sme vychádzali z vývojového diagramu, uvedeného v predchádzajúcej časti na Obrázku 8. Jeho simulink aplikáciu môžeme vidieť na obrázku 27.



Obrázok 27

Na vstupné svorky privádzame napätie U a prúd I. Tieto dve veličiny sú následne navzorkované tvarovačmi nultého rádu, ktorých vzorkovací čas je nastavený v okne na maske bloku MPPT P&O. Pomocou pamäti Memory si ukladáme 1 predchádzajúci vzorok (n-1) napätia a prúdu, z ktorých následne počítame rozdiel aktuálnej vzorky oproti predchádzajucej vzorke výkonu deltaP a rozdiel aktuálnej vzorky oproti predchádzajucej vzorke napätia deltaU. Tieto dve hodnoty vynásobíme a následne porovnávame v bloku Switch, kde zisťujeme či deltaP*deltaU>0, ak je táto podmínka splnená, přepínač Switch prepne na konštantu -1, ak táto podmienka nie je splnená, teda deltaP*deltaU<0, tak přepínač prepne na hodnotu 1. Táto konštanta nám v podstate len rozhoduje, či sa deltaD bude odčítávat, alebo pričítavať k hodnote aktuálneho vzorku D. Máme zistenú aktuálnu hodnotu D(n+1), ktorú nasledne opäť navzorkujeme a následne orežeme v bloku Saturation na maximálnu hodnotu 0.9 (najoptimálnejšia hodnota zistená simuláciami). Vzniká nám finálny signál D, ktorý už len spracúvavame v pulzne šírkovom generátore PWM, pozostávajúceho z hlavného bloku nosného pílovitého signálu a ďalších blokov, dolaďujúce výsledný signál na optimálnu hodnotu.

Na Obrázku 28 môžeme sledovať výstupné veličiny FV panelu (zhora výkon P, napätie U a prúd I).



Obrázok 28

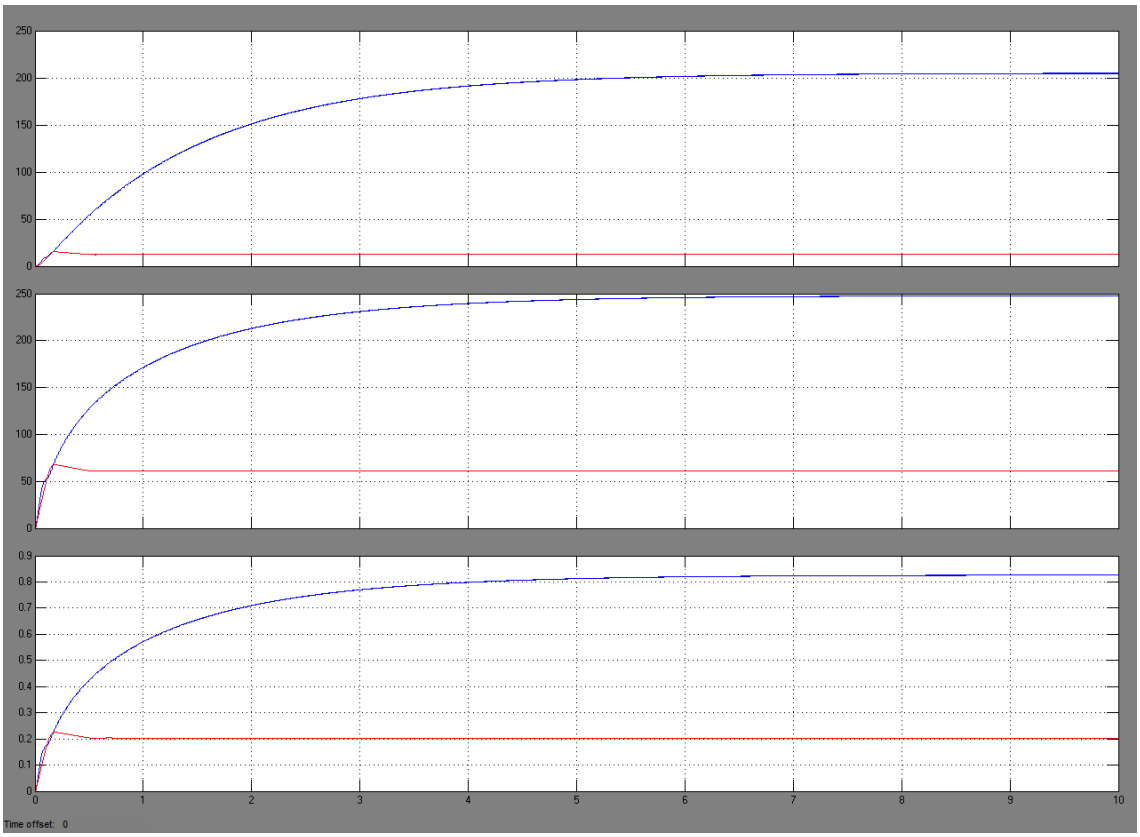
Všetky modré krivky príslušia k FV elektrárni, ktorá používa MPPT algoritmus na riadenie DC_DC meniča, červené krivky, elektráreň bez MPPT. Z vrchného grafu,

teda grafu výkonu P v závislosti na čase, môžeme sledovať, že výkon odoberaný z FV panelu riadeného DC_DC meniča pomocou MPPT, je naozaj maximálny menovitý výkon simulovaného FV panelu ReneSola JC250S, teda 250W. Drobné zákmity sú v závislosti na znižujúcej sa konštante deltaD menšie, to však pri následnej praktickej realizácií algoritmu kladie väčšie nároky na samotný AD prevod, alebo AD prevodník.

Po ustálení, teda cca 0.2s si algorimus našiel maximálny bod výkonu a z vyššie vysvtlenej podstaty funkčnosti tohto algoritmu kmitá okolo tohto bodu.

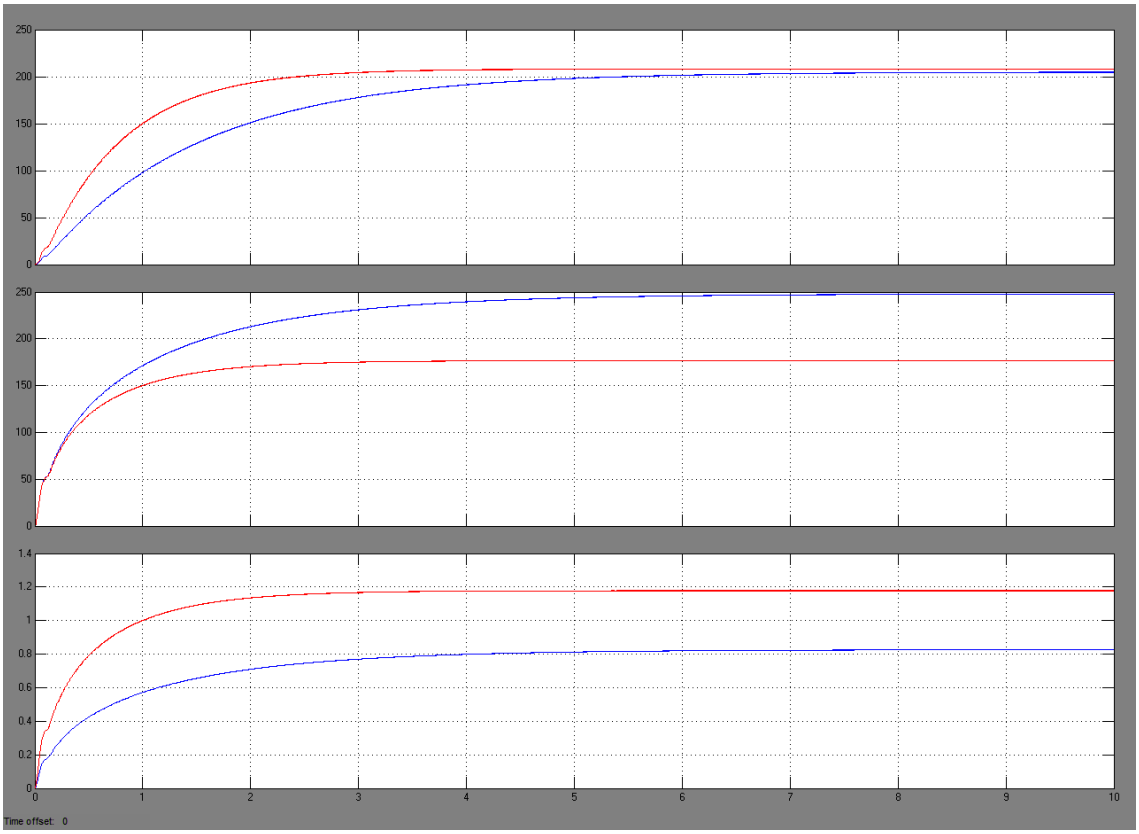
Všetky podmienky oboch elektrární boli totožné, teda frekvencia spínania PWM (frekvencia nosného pílovitého signálu pulzne šírkovej modulácie) bola 10kHz a odporová záťaž R_z, do ktorej pracovali R_z=300Ω.

Na Obrázku 29 sa nachádza graf s porovnaním (zhora) výkonov P, napätí U na záťaži R_z a prúdu I tečúceho záťažou R_z.



Obrázok 29

Na týchto charakteristikách môžeme pozorovať, že FV elektráreň s algoritmom MPPT má dlhší čas ustálenia, ale dosahuje výkonu až cca 200W na záťaži, kdežto pri charakteristikách FV elektrárne bez MPPT algoritmu môžeme pozorovať, že napätie U a prúd I a z toho výsledný výkon P je ovplivňovaný záťažou R_z. Toto však neplatí pri FV elektrárni s MPPT algoritmom, kde dodávaný výkon sa s meniacou záťažou nemení. Dokázanie toho sa nachádza na Obrázku 30.



Obrázok 30

Tu môžeme vidieť charakteristiky dvoch FV elektrární riadených algoritmom MPPT s tým rozdielom, že výkon dodávajú do 2 rôznych záťaží. Červené krivky zodpovedajú FV elektrárni so záťažou R_z=150Ω a modré krivky pre FV elektráreň so záťažou R_z=300Ω (zhora výkon P, napätie U a prúd I). Rozdiely čo sa týka výkonových kriviek, môžeme pozorovať len v dobe ustálenia sa výslednej hodnoty.

Princípom algoritmu je v podstate prispôsobobanie napätia U záťaži R_z tak, aby výkon bol stále maximálny.

Screen pre model vykreslujúci toto porovnanie neuvádzam, nakoľko je takmer totožny s modelom na Obrázku 26 s tým rozdielom, že spodná FV elektráreň je taktiež riadená algoritmom MPPT.

4 ZÁVER

Hlavným cieľom tejto práce bolo zoznámenie čitateľov s problematikou fotovoltaických článkov a spracovaním získanej energie z nich.

V úvode práce sme sa zoznámili so základnými pojmami, ktoré tvorili nasledujúce časti pojednávajúce či už o teórií potrebnej pre pochopenie danej problematiky alebo už výsledné modely v prostredí Simulink.

V teoretickej časti sme si podrobnejšie rozobrali fotovoltaický panel ako zdroj elektrickej energie, históriu fotovoltaických článkov, fotovoltaický jav, zakladné parametre určujúce charakteristiky fotočlánkov a následné druhy modelov či už náhradných alebo matematických, ktoré už priamo súvisia so simuláciou v Simulinku. Potom sme prešli na meniče elektrickej energie, ich využitia, rozdelenia podľa ich hlavných parametrov a princípov funkčností. Ako posledné sme si vysvetlili využitie MPPT algoritmu ako algoritmu pre prenos maximálneho výkonu z fotovoltaického panelu, vysvetlili princíp funkčnosti dvoch základných typov a pridali diagramy nevyhnutné pre praktický návrh týchto algoritmov.

V poslednej časti sme si nasimulovali základné modely nevyhnutné pre stavbu solárnej elektrárne, ukázali ich rozhranie a spôsoby nastavenia, odsimulovali základné charakteristiky.

Literatura

[1] Kreith, F., Kreider J. F.: Principles of Sustainable Energy, CRC Press, 2011, ISBN 978-1-4398-1407-9.

[2] Francisco M. González-Longatt: Model of Photovoltaic Module in Matlab, Cibelec, 2005

[3] Martin Střípek: Simulation of interconnection of solar cells in Matlab, Master´s Thesis, Brno, 2012

[4] Alexandr Krejčiřík: DC/DC meniče, Praha, 2001, ISBN 80-7300-045-8

[5] *DC/AC Pure Sine Wave Inverter* [online]. 2006-2007 [cit. 2014-01-02]. Dostupné z: http://www.wpi.edu/Pubs/E-project/Available/E-project-042507-092653/unrestricted/MQP_D_1_2.pdf

[6] *Photovoltaic technique* [online]. 2004 [cit. 2014-01-02]. Dostupné z: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0238092X13000091

[7] *Application of Circuit Model for Photovoltaic Energy Conversion System* [online]. 2011 [cit. 2014-01-02]. Dostupné z: http://www.hindawi.com/journals/ijp/2012/410401/

[8] *DC-DC Interleaved Converter* [online]. 2011 [cit. 2014-01-02]. Dostupné z: http://paginas.fe.up.pt/~ee07308/pages/conversor.html

[9] C. Liu, B. Wu and R. Cheung: Advanced algorithm for MPPT control of photovoltaic systems, Canadian Solar Builders Conference, Montreal, 2004

[10] *Zvyšující DC-DC měnič* [online]. 2007 [cit. 2014-01-02]. Dostupné z: http://free-energy.xf.cz/simulace/boost-conv.pdf

Prílohy

- Matlab m-file: FV_panel, FV_panel_v_závislosti_na_intenzite_žiarenia, FV_panel_v_závislosti_na_teplote
- Simulink modely .mdl : FV_panel_s, FV_panel_s1, FV_panel_s2 DC_DC_menic, DC_AC_menic, FV_porovnanie_MPPT_a_bez_MPPT, FV_porovnanie_MPPT_a_rozne_zataze