



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd

Vliv přesnosti sledování bodu maxima výkonu fotovoltaického zdroje
na ekonomické parametry fotovoltaické elektrárny

The influence of the accuracy of tracking maximum power point of
a photovoltaic plant on the economic parameters of photovoltaic powerplants

Bakalářská práce

Petr Chalupa

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Elektrotechnika a management

Vedoucí práce: Ing. Pavel Hrzina, Ph.D.

Praha 2019



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Chalupa** Jméno: **Petr** Osobní číslo: **466169**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Studijní obor: **Elektrotechnika a management**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Vliv přesnosti sledování bodu maxima výkonu fotovoltaického zdroje na ekonomické parametry fotovoltaické elektrárny.

Název bakalářské práce anglicky:

The influence of the accuracy of tracking maximum power point of a photovoltaic plant on the economic parameters of photovoltaic power plants.

Pokyny pro vypracování:

- 1) Proveďte analýzu rychlosti a profilu změn výroby FV elektrárny v závislosti na počasí a to jak na vstupu, tak na výstupu měniče (regulátoru).
- 2) Proveďte analýzu ztrát při rychlých změnách výkonu ve sledování bodu maximálního výkonu u měniče (regulátoru).
- 3) Určete závislost parametrů obvodů používaných pro sledování maxima výkonu fotovoltaického zdroje (MPPT) na pořizovací ceně měniče.
- 4) Proveďte ekonomickou analýzu dopadu výběru měniče s ohledem na parametry MPPT na provoz fotovoltaického systému a případně určete ekonomické náklady na úpravu systému.

Seznam doporučené literatury:

- [1] D. Sera, T. Kerekes, R. Teodorescu, a F. Blaabjerg, „Improved MPPT Algorithms for Rapidly Changing Environmental Conditions“, in 2006 12th International Power Electronics and Motion Control Conference, 2006, s. 1614–1619.
- [2] Gray, Jeffery L. The Physics of the Solar Cell. A. Luque a S. Hegedus. Handbook of Photovoltaic Science and Engineering. Chichester : John Wiley & Sons, Ltd., 2003, 3.
- [3] M. A. Eltawil a Z. Zhao, „MPPT techniques for photovoltaic applications“, Renew. Sustain. Energy Rev., roč. 25, s. 793–813, zář. 2013.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

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

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

Datum zadání bakalářské práce: **31.01.2019** Termín odevzdání bakalářské práce: **24.05.2019**

Platnost zadání bakalářské práce: **20.09.2020**

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

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem pro dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze, dne 24.5.2019

.....

Podpis

Poděkování

V první řadě bych chtěl poděkovat svému vedoucímu Ing. Pavlu Hrzinovi, Ph.D. za odbornou pomoc s vypracováním práce a veškerý čas, který mi věnoval. Dále bych rád poděkoval Ing. Michaele Lachmanové za její pomoc s vedením ekonomické části práce.

Abstrakt

Tato práce se zabývá rychlými změnami intenzity ozáření fotovoltaického panelu způsobenými přechodem oblačnosti a v návaznosti na to změnou polohy bodu maximálního výkonu. Jsou analyzovány a popsány různé algoritmy pro sledování bodu maxima, především se zaměřením na jejich účinnost při rychlých změnách intenzity ozáření panelu. Nakonec je provedena ekonomická analýza zaměřená na nalezení nejvýhodnějšího řešení pro zdroje malého a velkého instalovaného výkonu.

Klíčová slova

Bod maximálního výkonu, dynamická účinnost, FV zdroj, řídicí algoritmy, ekonomická analýza

Abstract

This work focus on a rapid changes in the intensity of irradiation of the photovoltaic panel caused by the transition of clouds and consequently the change of the point of maximum power. Various algorithms for monitoring the peak point are analyzed and described, especially with regard to their effectiveness in the rapid changes in panel irradiation intensity. Finally, an economic analysis is carried out to find the most advantageous solution for small and large scale power sources.

Key words

Maximum power point, dynamic efficiency, PV source, control algorithms, economic analysis

Zkratky

FV – fotovoltaický

G – intenzita ozáření panelu

P – výkon FV zdroje

I_{SC} – proud nakrátko

U_{OC}, V_{OC} – napětí naprázdno

MPP – bod maximálního výkonu (Maximum Power Point)

U_{MPP} – napětí v bodě maxima

I_{MPP} – proud v bodě maxima

P_{MAX} – maximální výkon

MPPT – Maximum Power Point Tracker

U_{ref} – referenční napětí

CV – Constant Voltage method

OV – Open-circuit Voltage method

SC – Short-circuit Current method

TG – Temperature Gradient method

TP – Temperature Parameter method

P&O – klasická Perturb and Observe method

P&O' – vylepšená Perturb and Observe method

P&O-A – analogové provedení

P&O-D – digitální provedení

INC, IC – Incremental Conductance method

FLC – Fuzzy Logic Control method

NB – Negative Big

NS – Negative Small

ZE – Zero

PS – Positive Small

PB – Positive Big

ANN – Artificial Neural Network method

ΔU – hodnota změny napětí

D – řídicí signál

E – chyba

ΔE – změna chyby

η_{stat} – statická účinnost algoritmu

η_{dyn} – dynamická účinnost algoritmu

typ dne A – jasný den

typ dne B – den s proměnlivou oblačností, velké množství změn

typ dne C – den s proměnlivou oblačností, málo časté změny

typ dne D – zatažený den

η_{MPPT} – účinnost algoritmu

$\eta_{\text{střídače}}, \eta_{\text{conv}}$ – účinnost střídače

$\eta_{\text{celková}}$ – celková účinnost měniče

η_{EURO} – vážená EURO účinnost měniče

t_{stat} – doba kdy je G uvažováno konstantní

t_{dyn} – doba kdy je G uvažováno proměnné

$t_{\text{celková}}$ – celková doba za, kterou jsou vyhodnocovány data

E – vyrobená energie systémem

CF – Cashflow

NPV – Net Present Value

Obsah

Úvod.....	10
1. Analýza časových změn intenzity ozáření.....	12
1.1. Popis různých typů dne podle slunečnosti.....	12
1.1.1. Jasný den.....	12
1.1.2. Den s proměnlivou oblačností.....	12
1.1.3. Zatažené dny.....	13
1.2. Průběh zastínění panelu.....	13
2. VA a PV charakteristiky FV článku.....	16
2.1. VA charakteristika.....	16
2.1.1. PV charakteristika.....	17
2.1.2. Vliv G a T na VA a PV charakteristiky.....	18
3. MPPT – Sledování bodu maximálního výkonu.....	19
3.1. Důvod sledování MPP.....	19
3.2. Možnosti sledování MPP.....	19
3.2.1. Bez MPPT – Constant Voltage (CV, Bez MPPT).....	19
3.2.2. Nepřímé metody.....	20
3.2.3. Přímé metody.....	21
3.2.4. Pokročilé metody.....	25
4. Účinnosti algoritmů.....	27
4.1. Účinnost algoritmů při rychlých změnách G, η_{dyn}	27
4.1.1. Přepočítání účinností FLC a ANN na hodnoty ze společného testu [13].....	28
4.2. Účinnost algoritmů při konstantním G, η_{stat}	30
4.3. Porovnání η_{dyn} a η_{sta} po přepočtu.....	31
4.4. Výpočet celkové účinnosti algoritmů při různých typech dne, η_{MPPT}	33
4.4.1. Jasný dny – typ A.....	33
4.4.2. Dny s proměnlivou oblačností - typy B a C.....	33
4.4.3. Zatažené dny – Typ D.....	34
4.4.4. Zhodnocení poměrů t_{sat} a t_{dyn}	35
4.5. Porovnání účinností algoritmů u jednotlivých typů dní.....	36
4.6. Výpočet celkové roční účinnosti MPPT.....	38
5. Popis jednotlivých částí měniče a jeho celková účinnost η_c	40
5.1. Hardwarové uspořádání měniče.....	40

5.1.1.	Dvou stupňový měnič – beztransformátorový.....	40
5.1.2.	Třístupňový měnič – s transformátorem	41
5.1.3.	Porovnání a uvedení předpokladů pro další část práce	41
5.2.	Účinnost střídače, $\eta_{\text{střídače}}$	42
5.3.	Celková účinnost měniče, $\eta_{\text{celková}}$	44
5.4.	Zhodnocení parametrů řídicí části obvodu na použitém algoritmu	45
6.	Vstupní parametry pro ekonomickou analýzu	46
6.1.	Rozdíl ve vyrobené energii	46
6.2.	Odhad ceny řídicí části měniče	48
7.	Výpočet NPV.....	51
7.1.	Malý výkon – rodinný dům.....	51
7.2.	Velké výkony	56
7.2.1.	Výstavba nové elektrárny.....	56
7.2.2.	Výměna měniče, u již fungující elektrárny	60
7.3.	Zhodnocení ekonomické části.....	62
	Závěr.....	63
	Zdroje	65
	Seznam obrázků	67
	Seznam tabulek.....	68
	Seznam grafů.....	68
	Seznam příloh.....	69

Úvod

Tato práce se zabývá přesností sledování bodu maximálního výkonu u fotovoltaických zdrojů, a s tím spojeným zvýšením výroby a dosažením lepších ekonomických výsledků daného projektu. Pozornost je věnována převážně analýze účinnosti uvažovaných algoritmů při rychlých změnách intenzity ozáření panelu, nicméně chování při konstantních podmínkách je také popsáno.

V první kapitole jsou zkoumány změny v intenzitě ozáření panelu způsobené přechodem oblačnosti nad daným FV zdrojem. Jsou analyzovány rychlosti změn ozáření panelu, a tím způsobené výkyvy v dodávaném výkonu. Poté je provedeno rozdělení na 4 základní typy dne podle výskytu oblačnosti.

Následuje popis VA a PV charakteristiky solárního článku. Dále je uvedena spojitost s VA charakteristikou diody. Jsou uvedeny významné body na těchto křivkách se zaměřením na bod maximálního výkonu. Je popsán pohyb toho bodu v závislosti na intenzitě ozáření panelu a teplotě.

Následující kapitola se věnuje problematice sledování bodu maximálního výkonu. Je vysvětlen důvod tohoto počínání a jeho vliv na celkovou energii vyrobenou FV zdrojem. Dále jsou prezentovány a vysvětleny principy fungování různých algoritmů a řešení využívaných v současnosti pro sledování bodu maxima. Jsou zmíněny výhody a nevýhody jednotlivých postupů, a případně je zhodnocena i náročnost jejich implementace, která podstatně ovlivňuje cenu daného řešení.

Následuje definice účinnosti MPPT a porovnání jednotlivých algoritmů při dynamických změnách intenzity ozáření. Jsou prezentována data ze společného testu 10 algoritmů, a s využitím dalších zdrojů jsou přepočteny hodnoty účinností pro řešení, která v testu hodnocena nebyla. Dále následuje snaha o získání informací o statických účinnostech jednotlivých algoritmů. Jsou analyzovány výsledky přepočtů a následuje porovnání statických a dynamických účinností. Na základě toho jsou pak vybrána nejrelevantnější data, která jsou uvažována pro následné výpočty.

Poté je provedena analýza osvitových dat a jsou zaznamenány poměry dob s konstantní a proměnnou intenzitou slunečního záření pro jednotlivé typy dní a ročních období. Na základě těchto hodnot jsou následně vypočteny účinnosti algoritmů pro všechny variace typů dní a ročních období. Pro jednotlivé algoritmy je nakonec vypočtena celková roční účinnost sledování bodu maximálního výkonu.

Následuje popis hardwarového uspořádání měniče. Jsou představeny dvě možnosti provedení s oddělovacím transformátorem a beztransformátorové, dále jsou zhodnoceny jejich klady a zápory s hlavním zaměřením na účinnost konverze DC/AC. Poté je zdefinována a popsána účinnost střídače. Dále jsou představena jednotlivá obvodová schémata používaná u jednofázových střídačů a je uveden rozdíl v účinnostech jednotlivých variant. V další části je pak popsána celková účinnost měniče, která se skládá jak z účinnosti MPPT, tak z účinnosti střídače. Následuje stručný přehled porovnávající jednotlivé varianty z pohledu potřebných komponent, komplexnosti řešení a ceny za dané provedení.

V poslední části práce je provedena ekonomická analýza zaměřená na použití nejvhodnějšího typu MPPT pro danou velikost a typ uvažovaného FV zdroje. Nejdříve jsou zhodnoceny rozdíly

v celkových účinnostech jednotlivých algoritmů, a s tím spojená vyšší výroba uvažovaného zdroje. V programu SAM od společnosti NREL je následně vytvořen modelový příklad dvou systémů, jedná se jednak o FV zdroj malého výkonu, uvažováno 5kWp, typicky fotovoltaický zdroj instalovaný na střechu rodinného domu, a zadruhé je namodelována solární elektrárna o výkonu 330 kWp. Z daného programu jsou pak získány údaje o výrobě jednotlivých typů řešení po dobu 20 let.

Dalším vstupním údajem pro ekonomickou analýzu je pořizovací cena měniče. Po konzultaci s vedoucím práce byl proveden kvalifikovaný odhad ceny řídicí části obvodu měniče, tedy MPPT. Odhad je proveden na základě analýzy obvodového schématu určitého měniče, dále pak zohledňuje také složitost implementace a náročnost vývoje jednotlivých řešení. Ze získaných dat je následně vypočtena cena za zbylou část měniče, tedy bez MPPT, a tato je pak uvažována pro všechny varianty stejná. Výsledkem jsou ceny měničů používajících jednotlivé typy algoritmů, a to jak pro variantu s malým, tak velkým výkonem.

V závěru práce je provedena analýza ekonomické výhodnosti jednotlivých řešení. Je vypočítáno rozdílové NPV pro oba typy výkonů a všechny typy algoritmů. Dále jsou provedeny citlivostní analýzy zohledňující různé ceny elektrické energie a diskontu. Pro variantu komerční elektrárny je kromě výstavby nového zdroje, uvažována i varianta výměny stávajícího měniče, u již zprovozněné FVE, za efektivnější, a je hodnoceno, zdali se tato výměna investorovi vyplatí.

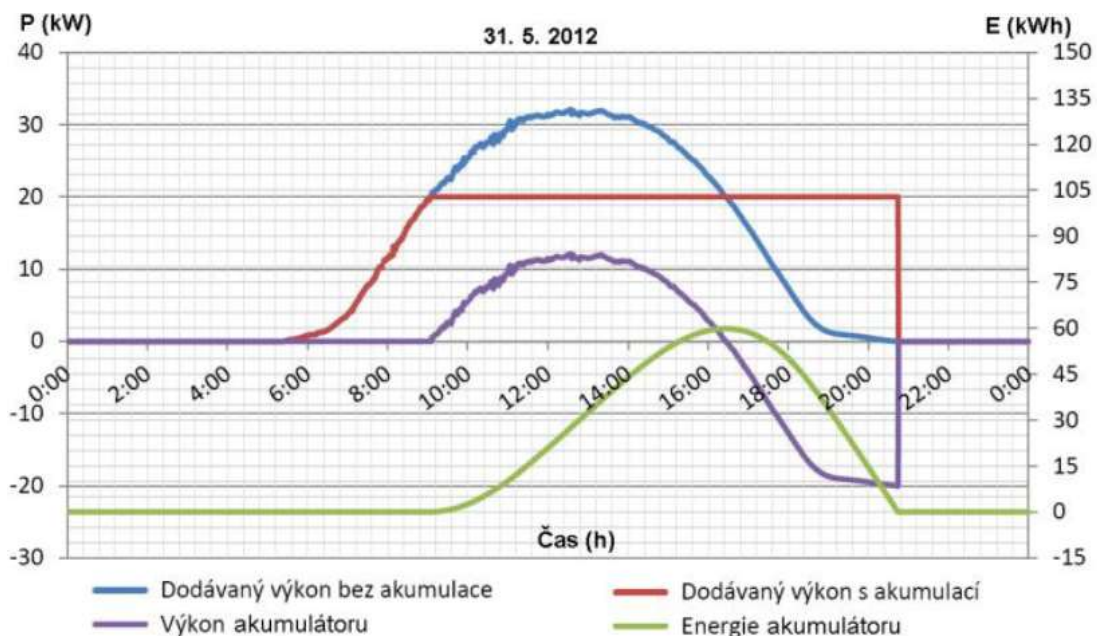
1. Analýza časových změn intenzity ozáření

1.1. Popis různých typů dne podle slunečnosti

Na začátku je vhodné si rozdělit dny do 3 skupin podle výskytu oblačnosti, která má zásadní vliv na průběh osvětlení FV zdroje. Bude se jednat o slunečný den bez oblačnosti, den s proměnlivou oblačností a den zatažený.

1.1.1. Jasný den

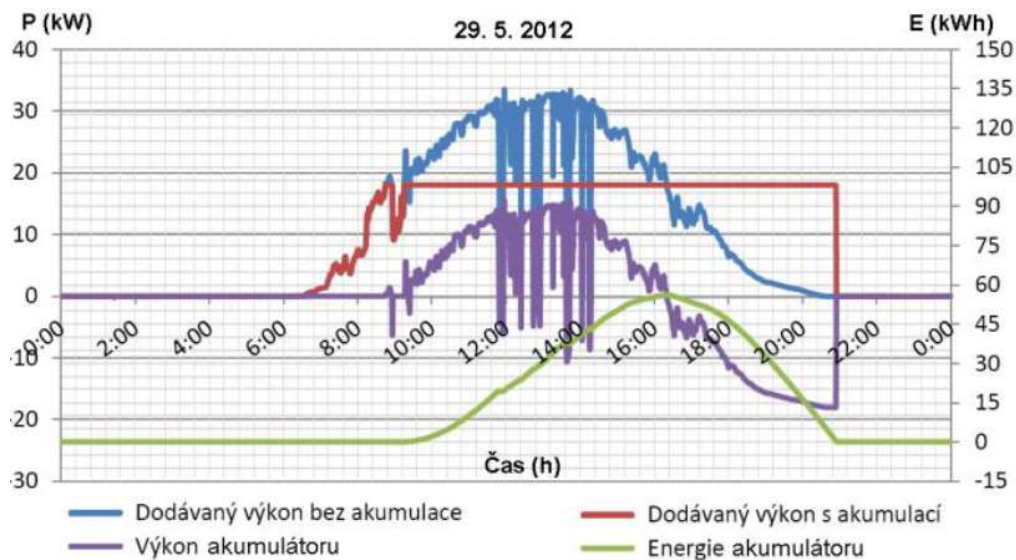
Tento typ dne se vyznačuje tím, že v průběhu dne se nevyskytuje téměř žádná oblačnost, a tím pádem nedochází ani k rychlým změnám intenzity ozáření panelu. Proto můžeme brát G , pro určité místo a den v roce, pouze jako funkci času [1]. Ukázka takového typu dne je na obr. 1, sledujte modrou křivku, zde je naznačen dodávaný výkon P , který je úměrný intenzitě osvětlení G .



Obrázek 1 - Simulace dodávaného výkonu P pro ideální slunečný den, P - modrá křivka, [1]

1.1.2. Den s proměnlivou oblačností

Toto pro nás bude nejdůležitější typ dne, v další části práce bude provedeno podrobnější rozlišení na dny s častými změnami oblačnosti a na dny s malým výskytem změn. Jak můžeme vidět z následujícího obrázku, dochází zde k poklesům dodávaného výkonu (modrý průběh mezi 12:00 až 14:30) vlivem zastínění panelu mraky, což způsobuje velmi rychlé poklesy G . Intenzita slunečního záření, potažmo výkon, se nám tedy nemění pouze s denní dobou, ale záleží také na zastínění panelu mraky.



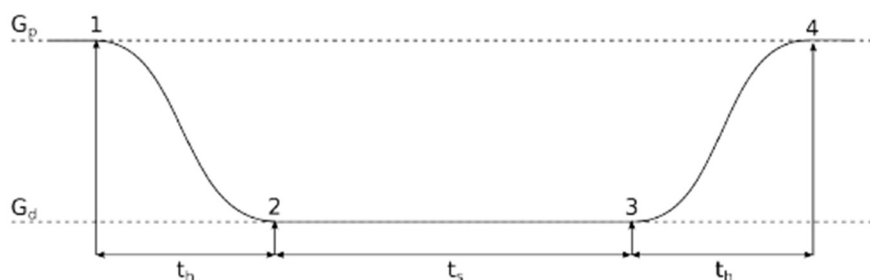
Obrázek 2 - Dodávaný výkon P (modrá křivka) pro den s proměnnou oblačností, [1]

1.1.3. Zatažené dny

Posledním typem dne je den zatažený. Zde je situace podobná jako u jasného dne. Intenzita slunečního záření se sice mění více než je tomu u jasného dne, nicméně absolutní velikosti změn a hlavně jejich strmost, jsou tak malé, že se G dá považovat za konstantní. Podrobnější popis tohoto typu dne viz. kapitola 4.

1.2. Průběh zastínění panelu

Jak jsem uvedl v minulé podkapitole, nejvíce nás bude zajímat den s proměnlivou oblačností. Musíme si tedy nejdříve analyzovat, jak rychle a s jakou strmostí probíhají změny G , potažmo dodávaného výkonu P . Touto problematikou se již zabýval jiný student ČVUT FEL [2], jím získaná data tedy budou jedním ze zdrojů, který bude prozkoumán. Dále jsou analyzována data ze tří odborných publikací [3]–[5].



Obrázek 3 - Závislost intenzity osvitů na fázích zastínění, [2]

Kde:

G_p – intenzita osvitů bez zastínění panelu (přímý osvit)

G_d – intenzita osvitů v době úplného zastínění (difuzní osvit)

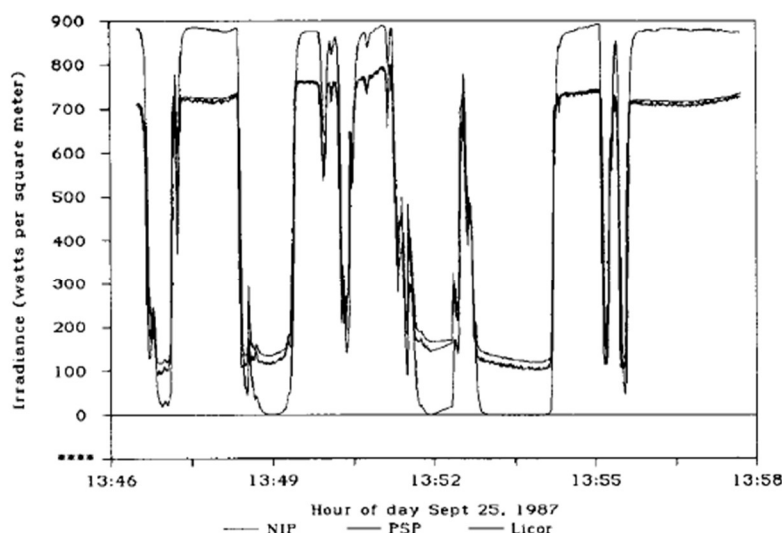
t_h – čas zakrývání a odkrývání slunečního kotouče

t_s – čas zastínění slunečního kotouče

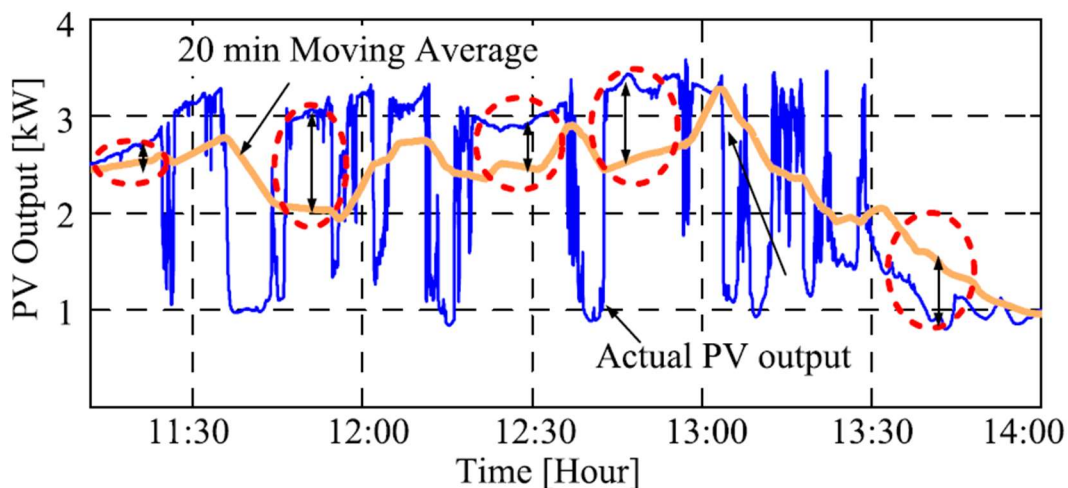
název mraku	typická výška mraku [km]	typický rozměr mraku [m]	typická rychlost větru [m/s]	t_h [s]	t_s [s]	t [s]
Cirrus	10	2000	15	6,203	133	146
Cirrocumulus	6	2000	18	3,102	111	117
Cirrostratus	4,5	5000	25	1,675	200	203
Altostratus	3,5	1500	10	3,257	150	157
Altostratus	2	4000	20	0,93	200	202
Nimbostratus	0,5	6000	7	0,665	857	858
Stratocumulus	0,5	4000	10	0,465	400	401
Stratus	0,5	2000	5	0,93	400	402
Cumulus	0,5	3000	15	0,31	200	201

Tabulka 1 - Tabulka typických hodnot pro oblaka a vypočítané časy, [2]

Z tabulky vidíme, že t_h se pohybuje od 0,3 s až do 6,2 s v závislosti na typu mraku a doba zastínění panelu je zhruba 100 s až 857 s. Vyřadíme-li vždy nejmenší a největší hodnoty, budeme se tedy pro t_h pohybovat v rozmezí cca 1 - 3 s a pro t_s zhruba 150 - 400 s, což odpovídá 2,5 - 6,5 min. Jiné zdroje [3] udávají t_h mezi 2 - 10 s, s průměrnou hodnotou 4,2 s a dobu zastínění panelu mezi 0,5 - 4 min. Úplně nejčastěji se však objevoval vzorek $t_s = 2,5$ min [3], podle [4] byla nejčastější hodnota cca 3 min, pro [5] pak 2 min, u všech těchto měření je však použit vzorek pouze z jednoho dne, případně dokonce hodiny, u [2] není četnost či postup měření uveden. Z toho vyplývá, že pokud bychom chtěli znát přesné hodnoty, museli bychom vždy provést měření pro dané místo, na kterém se bude FV zdroj nacházet. Měření by muselo probíhat po delší časové období, abychom nasbírali relevantní množství dat a následné výsledky by se musely statisticky zpracovat. Jelikož v další části práce jsou použita data z UCEEB, lokalita poblíž Prahy, použijeme tedy data z [2] a budeme dobu zastiňování panelu t_h uvažovat zhruba 1 s. Typické průběhy G můžeme vidět na obr. 4 a obr.5.

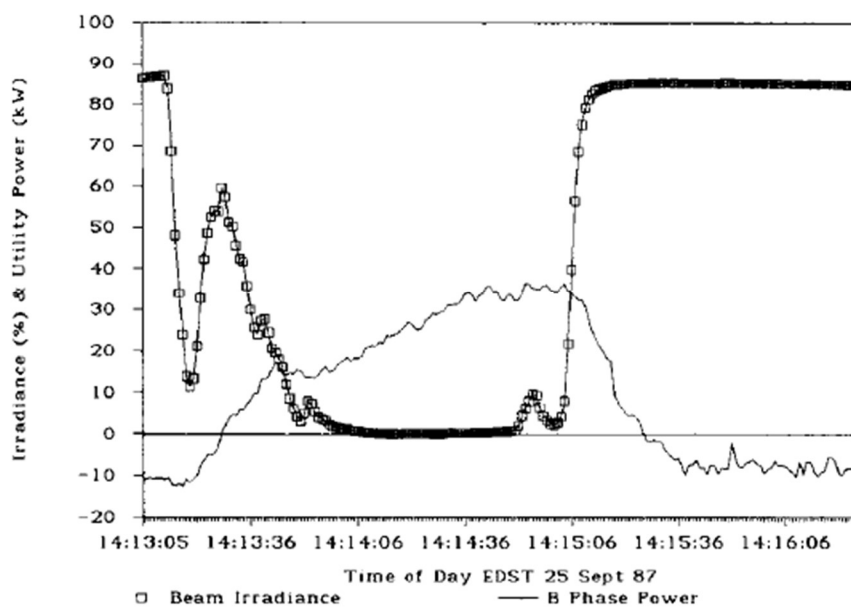


Obrázek 4 - Typický průběh G z dne s proměnlivou oblačností, [3]



Obrázek 5 - Klasický průběh G z dne s proměnlivou oblačností, [4]

Všechny modely počítaly se zjednodušením tvaru mraku na kruh a konstantní rychlostí. Bohužel ve skutečnosti takovéto podmínky nenastávají a může dojít například k prvnímu zastínění panelu okrajem mraku, následnému znovu ozáření způsobeném „dírou“ v mraku, a poté až dochází k druhému, a mnohem déle trvajícimu zastínění panelu. Takovýto průběh můžeme vidět např. na obr. 6. Další možností je průběh velice malých mraků, kdy celková doba zastínění celého panelu je velmi krátká [3]. Nakonec jen poznamenám, že experimentálně se ověřilo, že při zastínění panelu mrakem je G zhruba 6-7x menší než při přímém osvětlení [3], [4].

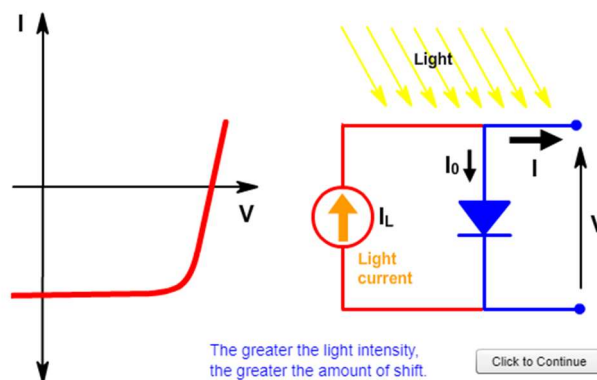


Obrázek 6 – Průběh G při zastínění panelu nehomogenním mrakem, [3]

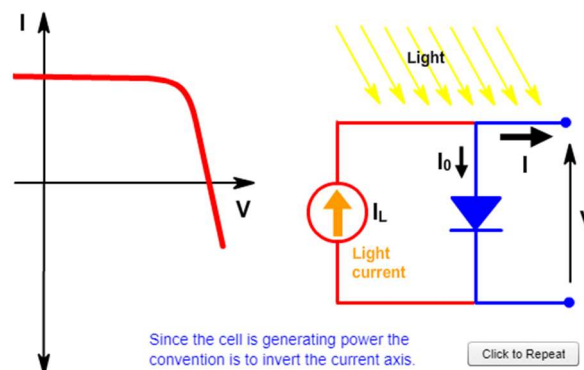
2. VA a PV charakteristiky FV článku

2.1. VA charakteristika

Jako první si uvedeme VA charakteristiku solárního článku. Jelikož solární článek je v podstatě dioda, bude i VA charakteristika téměř totožná s diodovou. V této práci není čas vysvětlovat odvození VA charakteristiky diody, bude uvedena tedy pouze výsledná charakteristika solárního článku při ozáření slunečním zářením, a pro uvažované $G = \text{konst.}$ a $T = \text{konst.}$ Na obr. 7 vidíme VA charakteristiku osvětlené diody, na obr. 8 pak VA charakteristiku solárního článku. Ta vznikne inverzí proudové osy podle osy napěťové, provádí se tak z důvodu, že solární článek energii dodává, nikoli spotřebovává jako je tomu u klasického použití diody. Čím více je článek osvětlen, tím více se posouvá křivka nahoru [6].

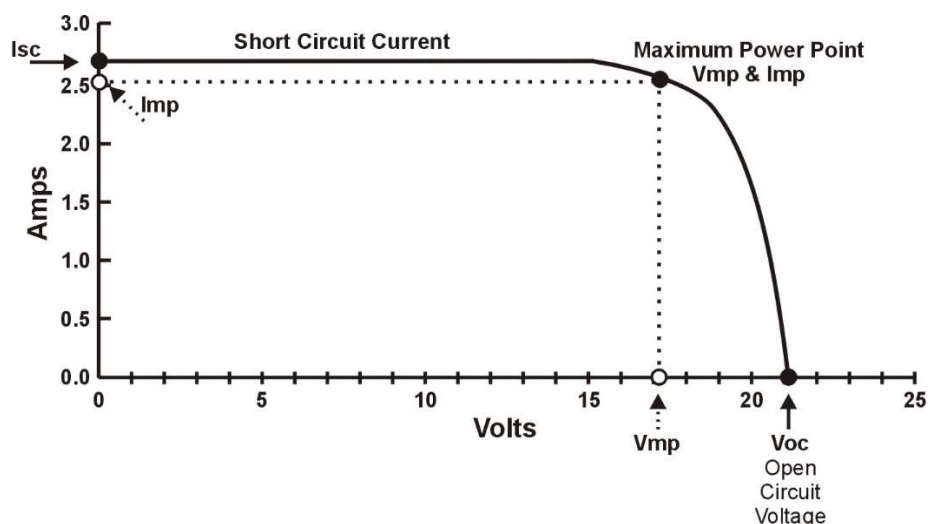


Obrázek 7 - Ozářená dioda, [6]



Obrázek 8 - VA charakteristika solárního článku, [6]

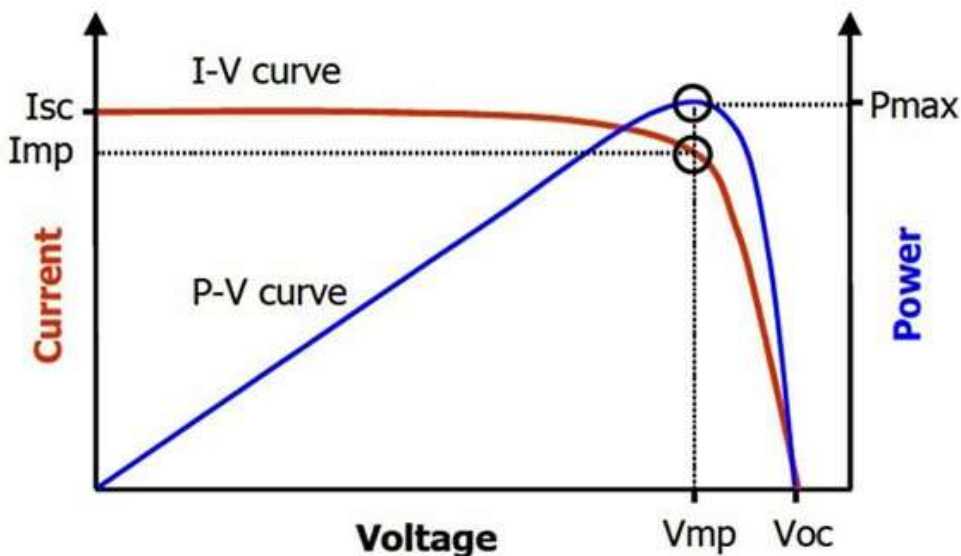
Na charakteristice můžeme pozorovat dva důležité body, které nám ohraničují danou křivku. Jsou jimi I_{sc} a U_{oc} (z ang. Short Circuit, Open Circuit). Proud I_{sc} je proud, který bude protékat obvodem, pokud bychom zkratovali svorky solárního článku. Oproti tomu U_{oc} je napětí, které bude na svorkách solárního článku při zapojení naprázdno.



Obrázek 9 - VA charakteristika solárního článku, I_{sc} a V_{oc} [7]

2.1.1. PV charakteristika

Zajímavější pro nás však bude výkonová charakteristika FV článku. Jedná se o závislost výkonu na napětí. Výkonová charakteristika je odvozena z VA charakteristiky. Při provozování FV článku samozřejmě chceme, abychom dostávali ze zdroje co největší možný výkon. Musíme se tedy pohybovat v pracovním bodu, který bude odpovídat bodu s největším výkonem, MPP. Tomuto bodu odpovídají napětí U_{MPP} a proud I_{MPP} , (z ang. Maximum Power Point). Také můžeme postřehnout, že výkonová křivka má pouze jedno maximum a pro hodnoty nalevo od tohoto bodu je křivka rostoucí a napravo od MPP má křivka klesající průběh. Těchto poznatků využívají některé algoritmy při hledání bodu maximálního výkonu, více v další kapitole. PV charakteristiku můžeme vidět na následujícím obrázku, $MPP = P_{max}$.



Obrázek 10 - PV charakteristika solárního článku, $MPP = P_{max}$ [8]

2.1.2. Vliv G a T na VA a PV charakteristiky

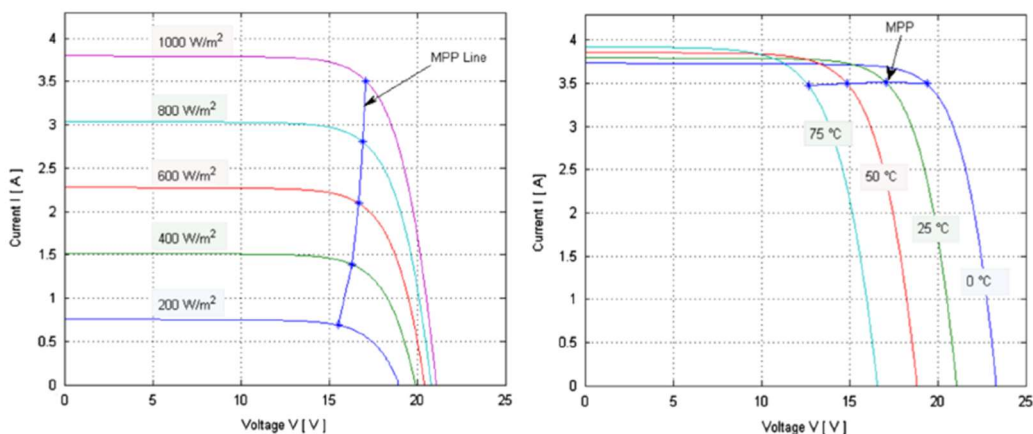
Jak jsme si uvedli výše, výkon panelu závisí na množství slunečního záření G dopadajícího na povrch panelu. Další faktor ovlivňující výkon panelu je teplota T . Uvedeme si tedy grafy závislosti výkonů panelu P na G a T .

2.1.2.1. Vliv G

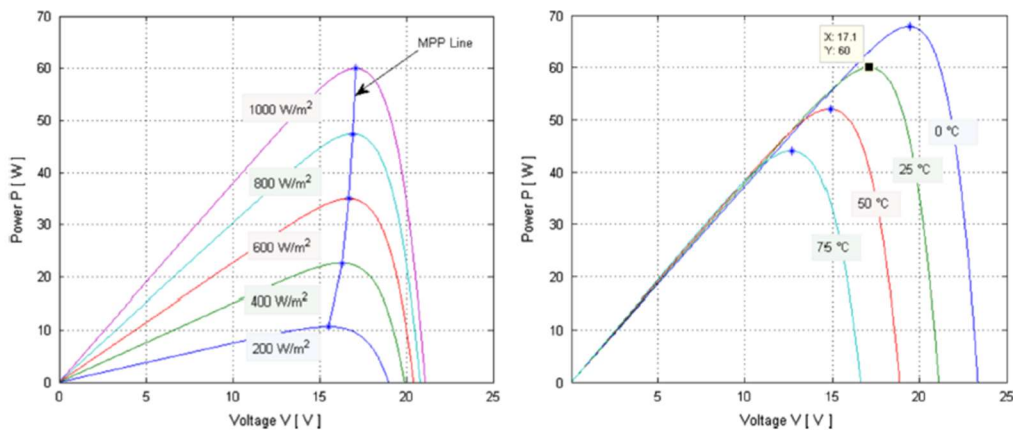
S poklesem G logicky klesá výkon dodávaný panelem. Rozdíl mezi dodávaným výkonem při nezastíněném a zastíněném panelu je cca 6-7 násobek [3], [4]. Na VA charakteristice můžeme pozorovat, že napětí U_{oc} se příliš nemění, oproti tomu proud I_{sc} se mění značně. Dané průběhy můžeme pozorovat na následujících obrázcích.

2.1.2.2. Vliv T

Druhým zásadním faktorem ovlivňujícím dodávaný výkon P je teplota. Tato práce je zaměřena na rychlé změny výkonu FV článku, ty jsou způsobeny převážně rychlými změnami G , v porovnání s rychlostí změny G je rychlost změny T řádově pomalejší. Při zastínění FV článku sice dochází postupně k ochlazení článku, nicméně tato změna je velice pomalá, a navíc po odstínění panelu teplota znovu stoupá. Proto pro nás tedy v této práci nebude hrát teplotní závislost VA a PV charakteristik významnou roli. Uvedeme však pro úplnost závislosti VA a PV charakteristik na teplotě, dále se jimi však nebudeme zabývat. Jak můžeme pozorovat na následujících obrázcích, se zvyšující se teplotou se parametry panelu zhoršují.



Obrázek 11 - VA charakteristika FV panelu v závislosti na G a T , [9]

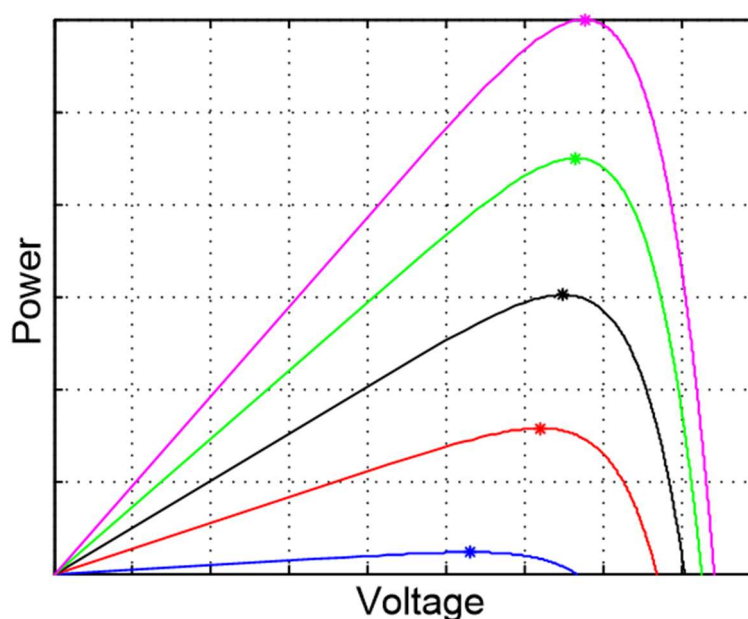


Obrázek 12 - PV charakteristika FV panelu v závislosti na G a T , [9]

3. MPPT – Sledování bodu maximálního výkonu

3.1. Důvod sledování MPP

Jak jsme si uvedli v předchozí kapitole, se změnou G se nám také mění PV charakteristika solárního článku, případně celého panelu. Jak vidíme z obr. 14, MPP označen hvězdičkou, poloha MPP má pro různá G , rozdílnou hodnotu napětí. Úkolem MPPT, (z ang. Maximum Power Point Treacking), je hledání MPP a v návaznosti na tom úprava napětí, při kterém odebíráme proud z FV panelu. Tímto mechanismem je zajištěno, že při měnících se hodnotách G vždy získáváme ze zdroje největší možný výkon.



Obrázek 13 - PV charakteristiky solárního panelu v závislosti na G s vyznačením MPP, [10]

3.2. Možnosti sledování MPP

Pro sledování bodu maximálního výkonu se používá různých metod. Jako nejzákladnější se jeví varianta bez jakéhokoli MPPT, tato bude porovnána v následné ekonomické analýze s metodami sledujícími bod maxima. Dále se rozlišuje mezi tzv. nepřímými, přímými a pokročilými metodami. V následující části bude představen popis nejčastěji používaných metod se zaměřením na metody použité v následné ekonomické analýze.

3.2.1. Bez MPPT – Constant Voltage (CV, Bez MPPT)

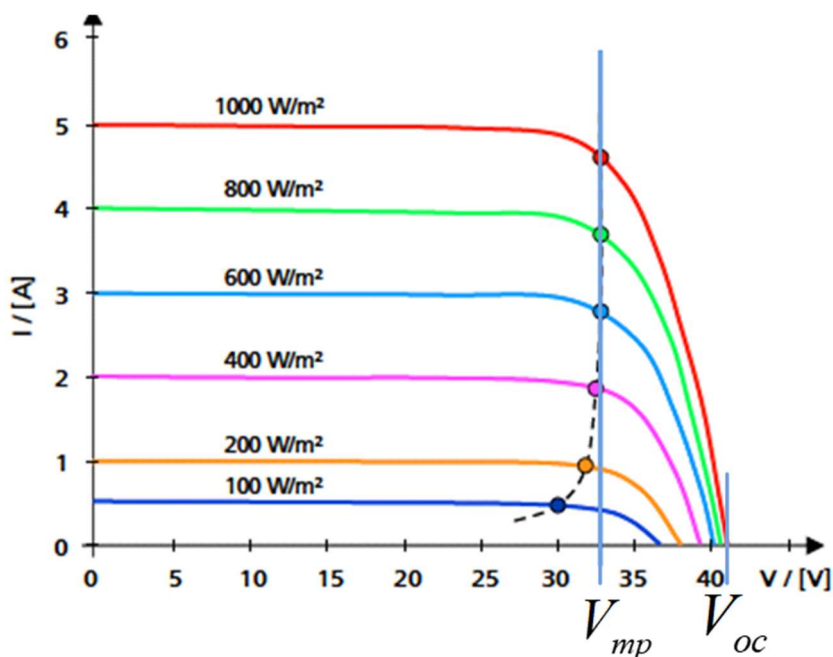
Jedná se o nejzákladnější a nejjednodušší řešení. Výstupní napětí je nastaveno na hodnotu U_{ref} , která je určena z předchozího měření pro daný FV zdroj. Dané řešení předpokládá, že $U_{ref} = U_{MPP}$. Tato varianta zanedbává vliv změny teploty a slunečního záření na polohu MPP a drží výstupní napětí stále na U_{ref} . Proto bude toto řešení dosahovat nejhorších výsledků. Někdy se provádí úprava U_{ref} podle ročního období. Také je nutné provést měření na místě instalace zdroje a podle naměřených závislostí nastavit U_{ref} .

3.2.2. Nepřímé metody

Tyto metody se vyznačují používáním průměrných hodnot a odhadů. Jak je tedy patrné, jejich přesnost, a tím pádem i přesnost sledování bodu maxima, nebude dosahovat takových výsledků jako metody přímé či pokročilé. Bohužel se mi ani pro jednu z těchto metod nepodařilo získat relevantní data, viz kap. 4, a proto nejsou tyto algoritmy zastoupeny v ekonomické analýze. Nicméně je možné předpokládat, že by se tento typ metod dosahoval horších výsledků než metody přímé a pokročilé.

3.2.2.1. Open-circuit Voltage (OV)

Při této metodě se využívá faktu, že $U_{MPP} = k \cdot U_{OC}$, pro široké pásmo hodnot G . Tato skutečnost byla experimentálně ověřena [11]. Důvodem je pouze malá změna U_{OC} při změnách G , viz popis v minulé kapitole. Konstanta k dosahuje pro křemíkové panely hodnoty mezi 0,73 - 0,8 [12]. Jak však můžeme vytušit, tato metoda nebude příliš přesná, MPP nikdy nenajde přímo, nicméně se bude pohybovat v dostatečné blízkosti. Jak vidíme z výše uvedeného vzorce pro zjištění MPP, je potřeba vždy změřit U_{OC} , to se dá změřit pouze při rozpojení obvodu. V tom okamžiku přestává FV zdroj dodávat energii, což je velice nežádoucí. Ztráta energie by byla tím větší, čím kratší by byla měřící perioda. Nicméně čím kratší tato perioda je, tím rychleji můžeme MPP sledovat. Z tohoto důvodu se na solární panely umísťuje tzv. testovací článek, který slouží pouze k měření požadovaných hodnot.



Obrázek 14 – VA charakteristiky solárního panelu v závislosti na G s vyznačením MPP, [10]

3.2.2.2. Short-circuit Current (SC)

Princip této metody je podobný jako u předchozího Open-circuit Voltage (OV), jediným rozdílem je, že místo napětí naprázdno U_{OC} se měří proud nakrátko I_{SC} . Znovu zde platí podobný vzorec jako u OV, konstanta k se volí mezi 0,78 - 0,9 pro polykrystalické panely [12].

$$I_{MPP} = k \cdot I_{SC} \quad (1)$$

3.2.2.3. Temperature Gradient (TG)

Tato metoda využívá faktu, že napětí naprázdno U_{oc} je lineárně závislé na teplotě článku. Potom s použitím rovnice (2), můžeme pomocí měření teploty získat napětí naprázdno U_{oc} [12], [13]. Dále už se postupuje stejně jako při Open-circuit Voltage (OV), výstupní napětí jenastaveno pomocí násobení údaje U_{oc} konstantou. Měřenými veličinami jsou tedy U a T .

$$U_{OC} \approx U_{OC_{STC}} + (T - T_{STC}) \cdot \frac{dU_{OC}}{dT} \quad (2)$$

Kde:

U_{OC} – napětí naprázdno

$U_{OC_{STC}}$ – napětí naprázdno při standartních teplotních podmínkách

T_{STC} – teplota článku při standartních teplotních podmínkách

T – teplota článku

$\frac{dU_{OC}}{dT}$ – teplotní gradient

3.2.2.4. Temperature Parametric (TP)

Tato metoda používá k zjištění U_{MPP} rovnice (3), jinak je postup stejný jako u předchozí metody. Měřené veličiny u této metody jsou U , G a T [12], [13].

$$U_{MPP} \approx (u + G \cdot v) + T \cdot (w - G \cdot y) \quad (3)$$

Kde:

U_{MPP} – napětí v bodě MPP

T – teplota článku

G – intenzita slunečního záření

u, v, w, y – parametry PV modulu při různých hodnotách G

3.2.3. Přímé metody

Přímé metody využívají skutečnosti, že PV křivka má jen jedno maximum, zde je tedy derivace rovna nule, a dále také toho, že vlevo od maxima je funkce rostoucí a napravo od maxima je funkce klesající. Při použití těchto metod se vychází z měření jak U , tak I . Ke sledování MPP se již oproti nepřímým metodám používá sofistikovanější algoritmus. Důsledkem toho je přesnější dosažení MPP a tím pádem maximalizace dodané energie systémem. Nevýhodou je složitější provedení oproti metodám nepřímým a tím pádem i vyšší cena.

3.2.3.1. Petrube and Observe – klasická (P&O, P&O-A, P&O-D)

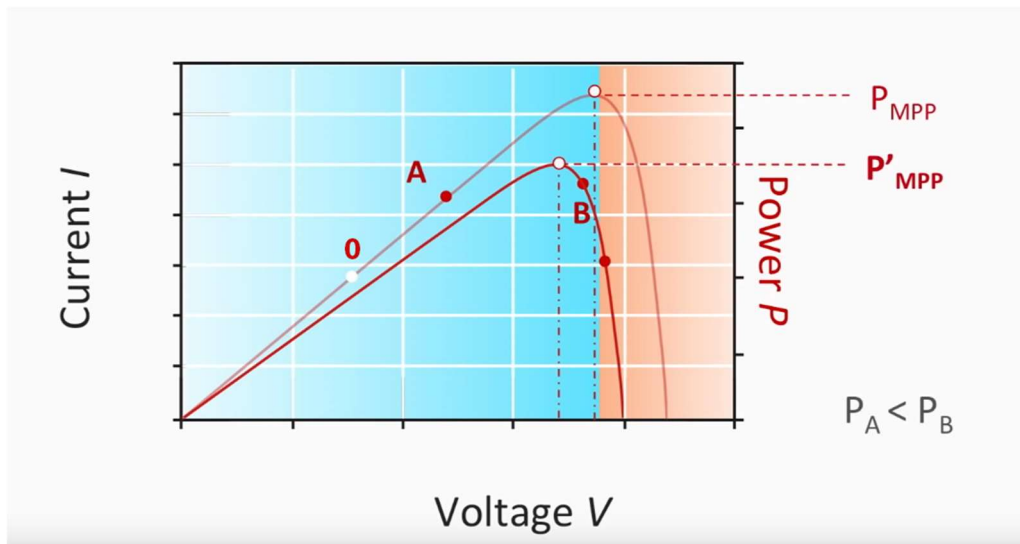
Tato metoda využívá tvaru PV křivky. Máme zde jedno maximum a s napětím menším, než U_{MPP} je křivka rostoucí a pro napětí větší, než U_{MPP} je křivka klesající. Pokud tedy se zvýšením U dojde ke zvýšení P , víme, že se pohybujeme nalevo od MPP, tudíž algoritmus při další iteraci předpokládá, že MPP je napravo od minulého bodu. Tímto způsobem se dostaneme až k bodu, při kterém přestane platit, že se zvýšením U se zvýšil P . Nacházíme se napravo od MPP. V tomto okamžiku algoritmus přestane zvyšovat napětí, a naopak začne napětí snižovat. Pokud se snížením napětí roste P , algoritmus pokračuje ve snižování napětí, a to až do doby, než

snížení napětí vede k snížení P . Poté se situace opakuje a algoritmus tímto způsobem konverguje až k MPP. Blokové schéma algoritmu je ukázáno na obr. 16.

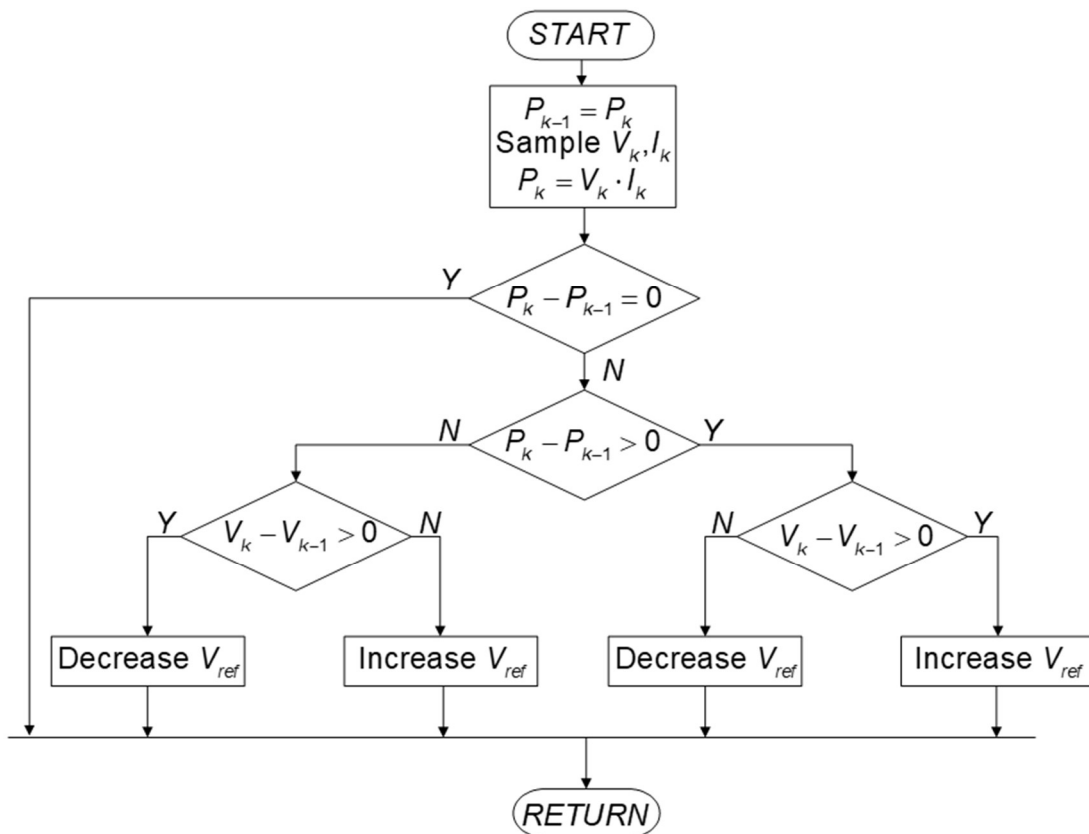
Zásadní nevýhodou je, že při rychlých změnách G a při dlouhé vzorkovací periodě může dojít k zpomalení konvergence algoritmu [10], [11], [14]. Ukážeme si to na následujícím obrázku, obr. 16. Měření začalo v bodě 0. Se zvětšením napětí roste i a P , bod A. Algoritmus tedy provede v další iteraci znovu zvýšení napětí o ΔU , tím se dostaneme do bodu B. Ovšem v době mezi měřeními A a B se snížilo G , a tím pádem se nám také změnil tvar PV křivky. Bod B tedy nyní leží napravo od MPP, s vzrůstem U o ΔU , mezi body A a B, se však zvýšil výkon, tudíž algoritmus bude při příští iteraci znovu zvyšovat U , i když už se bod B nachází napravo od MPP. Tím pádem dojde ke zpomalení konvergence algoritmu a potažmo ke ztrátě energie. V [13] byl použit algoritmus s fixním posunem a to $0,37\% U_{oc}$. Jelikož je posun konstantní velikosti a není potřeba žádných dodatečných výpočtů, je možné tuto základní nevyplešnou variantu algoritmu realizovat jak analogově, tak digitálně [9], [12], [15]. Je však možné zvolit i digitální implementaci. V [13] této metodě odpovídá P&Oa, v [9] pak P&O.

Další nevýhodou je, že nikdy nenajdeme MPP přímo, ale vždy se pohybujeme pouze v jeho okolí [11], [14], při konstantní hodnotě G dochází k oscilacím okolo bodu maxima, to je způsobeno přímo principem metody P&O, jak napovídá anglický název, algoritmus provádí pravidelný posun napětí o určitou hodnotu ΔU a poté vyhodnocuje změnu výkonu, z těchto dat následně rozhoduje o směru příštího posunutí U a takto funguje a tento proces se stále opakuje. To má za následek snížení účinnosti sledování bodu maximálního výkonu při neměnných hodnotách intenzity slunečního záření.

Problém může nastat také při malých hodnotách G , kdy se PV křivka stává velice plochou, tudíž je pro algoritmus těžší najít její maximum. Nicméně navzdory těmto nevýhodám se jedná o jednu z nejpoužívanějších metod [11].



Obrázek 15 - Zmatení algoritmu při rychlé změně G , [11]



Obrázek 16 - Schéma algoritmu P&O, [10]

3.2.3.2. Petrube and Observe – variable step size (P&Ob, P&O-D')

Jako další byla použita optimalizovaná P&Ob metoda. Ta má oproti P&Oa proměnnou velikost posunu napětí ΔU , tato velikost je vypočítána jako průměr, pro výpočet jsou použita data z několika předešlých hodnot výkonů. Při rychlých změnách slunečního záření jsou tedy postupně nastavovány větší posuny a tím pádem je zajištěno rychlejšího dosažení bodu maxima. Naopak při klidovém stavu se posun zmenšuje a tím pádem dochází k menším oscilacím okolo MPP. To má za následek zvýšení účinnosti sledování bodu maxima.

3.2.3.3. Petrube and Observe – třibodová (P&Oc)

Další variací P&O metody je tzv. třibodová metoda. Ta používá k sledování MPP tři body oproti dvěma, použitým v minulých metodách. Jako první bod A uvažujeme současný stav, poté dochází k posunu pracovního bodu do bodu B a následuje posunutí do bodu C, zde je velikost posunutí dvojnásobná oproti předcházející, ale v opačném směru. Může nastat 9 kombinací. Pokud je výkon P v bodě B větší nebo roven v bodě A, je stav označen jako kladný, pokud je tomu naopak je stav označen jako záporný. Je-li výkon v bodě C menší než v A, je stav označen jako kladný, jinak je stav označený záporně. Pokud jsou oba stavy kladné, bude upraven řídicí signál pro gate driver, napětí se zvýší, pokud jsou oba záporné tak naopak bude napětí sníženo, a je-li jeden stav kladný a druhý záporný, je dosaženo MPP a řídicí signál se nemění.

3.2.3.4. Incremental Conductance – klasická (ICa, INC)

Tato metoda je podobná jako metoda P&O. Využívá se faktu, že v MPP je derivace výkonu podle napětí nulová. Vpravo od MPP je derivace záporná a vlevo od MPP kladná. Měřenými veličinami jsou I a U , výstupní veličinou je řídicí signál D , resp. tím ovlivněné U . Při běhu algoritmu se vždy udržuje předchozí naměřená hodnota, která se následně porovnává s novou hodnotou. Pokud není zjištěna změna ($G = \text{konst.}$) systém zůstává v klidu a nemění D , resp. U . To ho odlišuje od P&O metody, která provádí změnu U v každém kroku. Z tohoto důvodu by měl INC dosahovat, oproti P&O, lepších výsledků při neměnných hodnotách intenzity osvětlení. Implementace řídicího zařízení je celkem složitá a tím pádem je i cena vyšší než u P&O [11].

Při použití zjednodušení můžeme uvažovat (4). Dále platí (5), v MPP pak tedy je, jak bylo řečeno dříve, derivace výkonu podle napětí nulová, z toho vychází (6), [10], [11]. Pro lepší pochopení přikládám obr. 18. a obr. 19.

$$\frac{dP}{dU} \approx \frac{\Delta P}{\Delta U} \quad (4)$$

$$\frac{dP}{dU} = \frac{U \cdot dI}{dU} + \frac{I \cdot dU}{dU} = U \cdot \frac{dI}{dU} + I \quad (5)$$

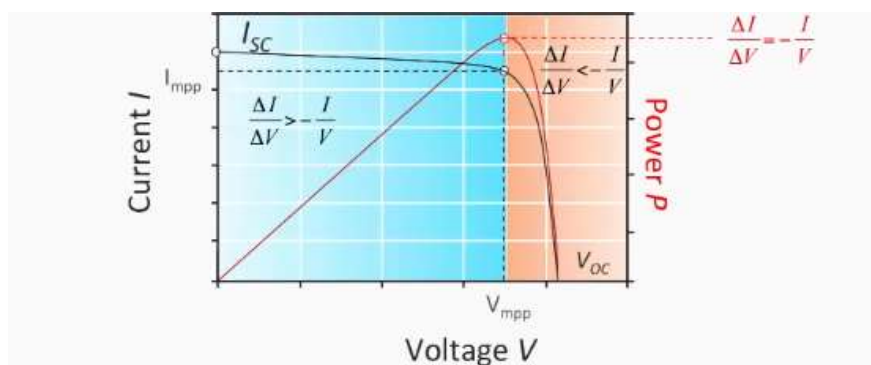
$$\frac{dP}{dU} = 0 \Rightarrow \frac{dI}{dU} = -\frac{I_{mp}}{U_{mp}} \approx -\frac{\Delta I}{\Delta U} \quad (6)$$

Pak tedy platí:

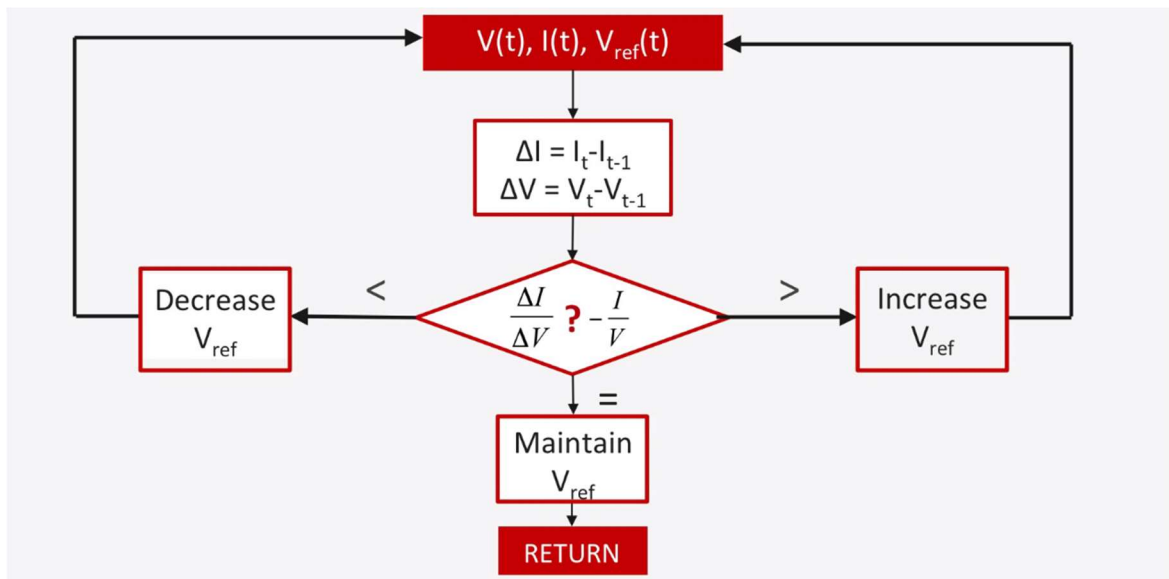
$$\frac{\Delta I}{\Delta U} = -\frac{I}{U} \quad \text{v MPP} \quad (7)$$

$$\frac{\Delta I}{\Delta U} > -\frac{I}{U} \quad \text{nalevo od MPP} \quad (8)$$

$$\frac{\Delta I}{\Delta U} < -\frac{I}{U} \quad \text{napravo od MPP} \quad (9)$$



Obrázek 17- Grafické znázornění algoritmu INC, [11]



Obrázek 18 - Schéma algoritmu INC, [11]

3.2.3.5. Incremental Conductance – upravená (ICb)

Použito v [9]. Jedná se v podstatě o kombinaci dvou metod, a to klasické IC a Constant Voltage (CV). Pokud je velikost G menší než 30 % nominální hodnoty, je použita metoda CV. Naopak pokud je G větší než 30 %, je použita IC. Jak je patrné, je proto potřeba, aby bylo navíc přítomno také čidlo intenzity ozáření panelu, což by tuto variantu oproti klasické metodě prodražilo.

3.2.4. Pokročilé metody

Jedná se o nejnovější a také nejvíce vyspělé metody sledování MPP. Obecně je pro jejich provoz potřeba větší výpočetní výkon než u konvenčních metod. To má také vliv na jejich cenu. U [13] nebyly z důvodu malého rozšíření, v dané době, tyto varianty součástí testování. Z důvodu značného rozdílu v účinnosti jsem se však rozhodl je v této práci do porovnání zařadit. Tyto typy algoritmů také bývají někdy použity v kombinaci s některým konvenčním řešením. V této práci popíši dva základní a nejpoužívanější typy algoritmů.

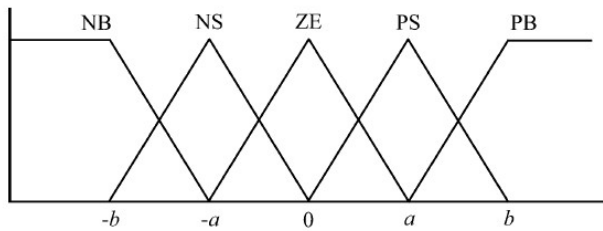
3.2.4.1. Fuzzy Logic Control (FLC)

Tato metoda využívá fuzzy logiky. Při procesu hledání MPP rozlišujeme tři procesy. Prvním je tzv. fuzzyfikace, jedná se o transformaci vstupních numerických dat, naměřené hodnoty proudu a napětí, na lingvistické proměnné. Výstupem bývají dvě proměnné, a to chyba E a změna chyby ΔE , ty jsou definovány následujícími rovnicemi.

$$\Delta E = E(n) - E(n - 1) \quad (11)$$

$$E = \frac{P(n) - P(n - 1)}{V(n) - V(n - 1)} \quad (10)$$

Při převodu je numerickým proměnným přiřazena jedna z 5 hodnot lingvistických proměnných, a to na základě jejich numerické hodnoty a podle předem zvolených pravidel. V druhé fázi je podle pravdivostní tabulky rozhodnuto o výstupní veličině, která nabývá jedné z lingvistických hodnot, viz obr. 20. Ta odpovídá velikosti změny řídicího signálu D . V poslední části je lingvistická proměnná převedena zpátky na numerickou a pomocí řídicího signálu je v měniči zvolena hodnota napětí odpovídající U_{MPP} [12], [15].



Obrázek 19 - Lingvistické proměnné, [12]

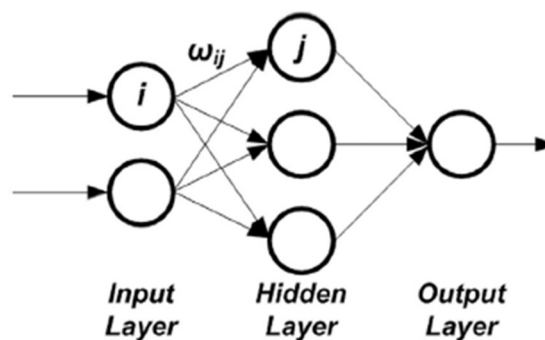
ΔE E	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	ZE	ZE	NB	NB	NB
NS	ZE	ZE	NS	NS	NS
ZE	NS	ZE	ZE	ZE	PS
PS	PS	PS	PS	ZE	ZE
PB	PB	PB	PB	ZE	ZE

Obrázek 20 - Pravdivostní tabulka pro FLC, [12]

3.2.4.2. Artificial Neural Network (ANN)

Jedná se o algoritmus s umělou inteligencí, který je odvozen od chování lidských neuronů. Skládá se ze 3 vrstev: vstupní, skrytá a výstupní. Vstupní vrstva se skládá z naměřených vstupních veličin, jedná se o napětí, proud, teplotu a intenzitu slunečního záření. V druhé vrstvě probíhá výpočet na základě vážené hodnoty spojení mezi danými uzly. Názorná ukázka v obr. 22. Výstup z druhé vrstvy je odeslán do poslední vrstvy, kde je transformován na velikost střídavého signálu pro měnič, podle čehož je nastaven bod maximálního výkonu [12], [15].

Tento typ algoritmu je schopen strojového učení a postupem času si z měřených dat sám upravuje velikosti vah propojení různých uzlů. To má za následek lepší sledování a odhad výskytu MPP. Nevýhodou však je, že metoda musí být nastavena a je použitelná jen na konkrétním místě a pro konkrétní typ panelu. Další problém nastává při změnách PV charakteristik s časem, kde je vždy po určité době nutná recalibrace systému [12].



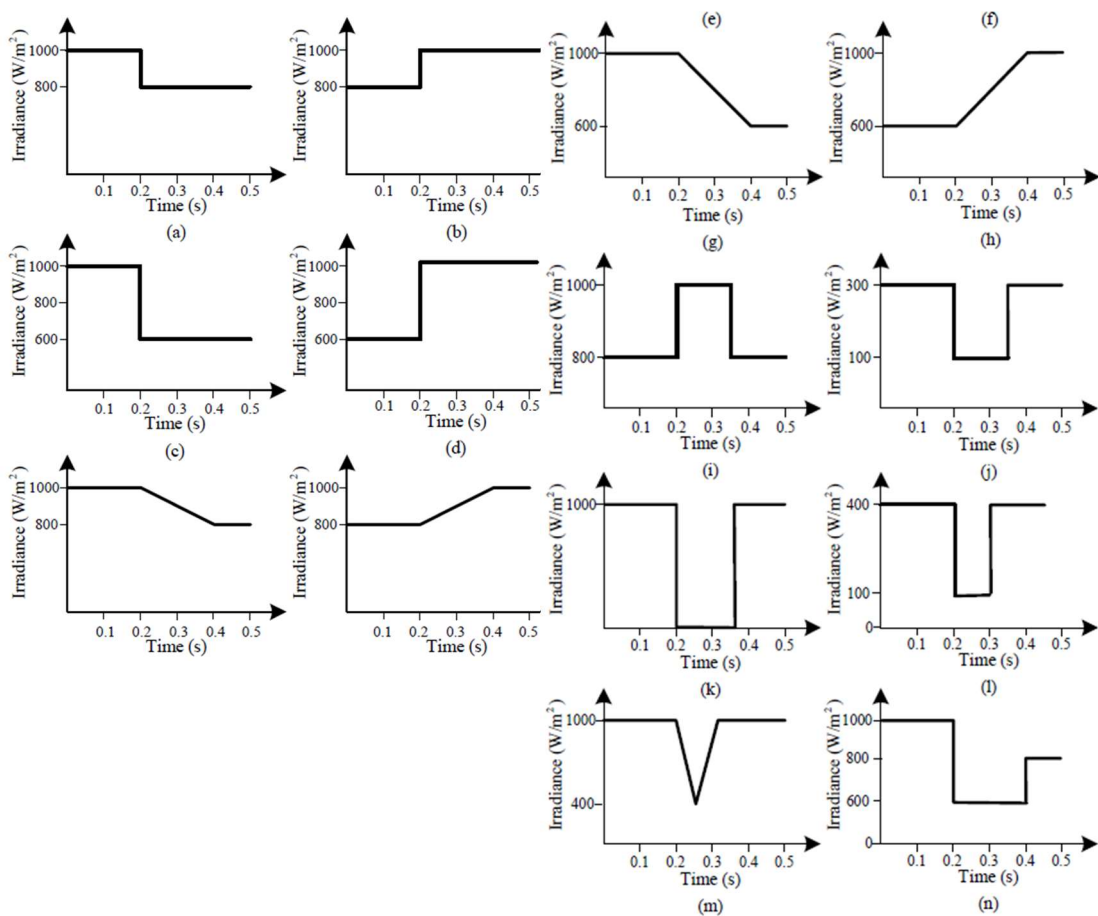
Obrázek 21 - struktura ANN, [12]

4. Účinnosti algoritmů

4.1. Účinnost algoritmů při rychlých změnách G , η_{dyn}

V této kapitole budou popsány rozdíly v schopnostech jednotlivých algoritmů sledovat bod maximálního výkonu při rychle se měnících hodnotách intenzity slunečního záření, tak jak je tomu při zastínění a odstínění panelu mraky. K analýze byla využita data z [13], kde byl proveden test 10 algoritmů. FLC a ANN v [13] bohužel otestovány nebyly, nicméně provedl jsem přepočty účinností těchto algoritmů vzhledem k metodě P&Oa, INCa, OV a SC s použitím dat z [16], [17] a výsledky doplnil do tabulky 2. Popis a metodika přepočtu jsou uvedeny v další podkapitole. Vzhledem k tomu, že se jedná o přepočty a tyto algoritmy nebyly testovány spolu s ostatními, je nutné brát hodnoty jejich účinností pouze jako orientační. Účinnost algoritmu η_{MPPT} je definovaná podle vzorce (12).

Při testu bylo odsimulováno celkem 14 typů průběhů, které se dělí do 5 skupin a to: skokové průběhy (a-d), průběh typu rampa (e-h), obdélníkový průběh (i-l), trojúhelníkový průběh (m), dvou stupňový průběh (n). Bohužel není k dispozici žádný bližší popis simulace. Na následujícím obrázku jsou ukázány použité průběhy, obr. 23.



Obrázek 22 - Průběhy G použité při simulacích v [13]

$$\eta_{MPPT} = \frac{\int_0^T p_{DC}(t)dt}{\int_0^T p_{MPP}(t)dt} \quad (12)$$

Kde:

$\int_0^T p_{DC}(t)dt$ – celková maximální teoreticky možná hodnota energie získané z FV zdroje
 $\int_0^T p_{MPP}(t)dt$ – opravu získaná energie, přivedená na střídač

Průběh	Teor. maximální energie [J]	CV [J]	SC [J]	OV [J]	P&Oa [J]	P&Ob [J]	P&Oc [J]	ICa [J]	ICb [J]	TG [J]	TP [J]	FLC [J]	ANN [J]
(a)	1711	1359	1539	1627	1695	1707	1490	1708	1708	1562	1681	-	-
(b)	1785	1410	1687	1700	1774	1781	1558	1782	1782	1643	1761	-	-
(c)	1481	1192	1337	1403	1465	1476	1301	1478	1478	1311	1424	-	-
(d)	1633	1290	1492	1552	1625	1628	1416	1628	1628	1476	1589	-	-
(e)	1785	1403	1659	1699	1769	1780	1543	1782	1782	1643	1762	-	-
(f)	1711	1363	1636	1630	1692	1697	1508	1709	1709	1563	1683	-	-
(g)	1633	1298	1351	1552	1617	1627	1432	1630	1630	1477	1593	-	-
(h)	1482	1204	1397	1409	1441	1431	1311	1479	1479	1314	1429	-	-
(i)	1674	1339	1562	1595	1664	1671	1480	1672	1672	1522	1642	-	-
(j)	457	386,2	398,4	401,1	445,2	446,3	437,5	411,6	446,3	354,8	354,8	-	-
(k)	1354	1036	1247	1245	1332	1343	1153	1250	1333	1259	1338	-	-
(l)	540	459	427	479	524	525	515	469	503	397	444	-	-
(m)	1819	1410	1589	1730	1801	1812	1567	1808	1810	1681	1795	-	-
(n)	1558	1248	1388	1478	1542	1553	1370	1555	1555	1395	1510	-	-
Celkem	20623	16397	18709	19500	20386	20477	18081	20361	20515	18597	20005	-	-
Pořadí	0	12	9	8	5	4	11	6	3	10	7	2	1
$\eta_{MPPT, dyn}$	100,00%	79,51%	90,72%	94,56%	98,85%	99,29%	87,68%	98,73%	99,48%	90,18%	97,01%	99,62%	100,67%

Tabulka 2 - Účinnosti daných algoritmů při dynamických změnách G, [13]

4.1.1. Přepočítání účinností FLC a ANN na hodnoty ze společného testu [13]

V [13] byly testovány pouze konvenční algoritmy, a to z důvodu nepřilíš velkého komerčního používání pokročilých metod (FLC a ANN) v daný čas. Nicméně podle teoretických předpokladů by tyto algoritmy měly dosahovat vyšší účinností sledování bodu maxima, a to až o jednotky procent, a proto jsem je do své analýzy zařadil.

Data pro přepočítání metody FLC a ANN byla převzata z [17]. V této studii byla provedena simulace v prostředí Simulink, byl zde použit solární panel o výkonu 40 Wp, jako vstupní údaje byly použity G a T, kde intenzita slunečního záření se náhodně měnila, a to v rozmezí od 89 W/m² do 586 W/m², a stejně tak teplota, od 25 °C to 35 °C. V [17] byla použita klasická metoda P&O a bude tedy porovnána s metodou P&Oa z [13]. U metody INC není uvedeno o jaký typ se jedná, nicméně není uvedeno že by se jednalo o vylepšenou metodu a budeme tedy uvažovat klasickou INC, která odpovídá INCa z [13]. Použijeme také data z OV a SC a výslednou dynamickou účinnost metod FLC a ANN budeme uvažovat jako aritmetický průměr přepočtených účinností. Jak je vidět z výsledků, hodnoty přepočtené z algoritmu SC jsou značně odlišné od ostatních, a navíc neodpovídají ani teoretickým předpokladům, a proto je pro výpočet výsledné účinnosti nepoužijeme, a to jak u FLC, tak u ANN. Výpočet proběhl podle vzorce (13), resp. (14).

$$\frac{A}{X} = \frac{C}{D} \Rightarrow X = A \cdot \frac{D}{C} \quad (13)$$

$$\frac{Algoritmus_{[13]}}{X} = \frac{Algoritmus_{[17]}}{FLC_{[17]}} \Rightarrow X = Algoritmus_{[13]} \cdot \frac{FLC_{[17]}}{Algoritmus_{[17]}} \quad (14)$$

$$X_{FLC/P\&O} = P\&O_{[13]} \cdot \frac{FLC_{[17]}}{P\&O_{[17]}} = 98,85 \cdot \frac{98,02}{97,52} = 99,35 \% \quad (15)$$

$$X_{FLC/INC} = INC_{[13]} \cdot \frac{FLC_{[17]}}{INC_{[17]}} = 98,73 \cdot \frac{98,02}{97,96} = 98,79 \% \quad (16)$$

$$X_{FLC/OV} = OV_{[13]} \cdot \frac{FLC_{[17]}}{OV_{[17]}} = 94,56 \cdot \frac{98,02}{92,00} = 100,74 \% \quad (17)$$

$$X_{FLC/SC} = SC_{[13]} \cdot \frac{FLC_{[17]}}{SC_{[17]}} = 90,72 \cdot \frac{98,02}{96,00} = 92,62 \% \quad (18)$$

$$\bar{X} = \frac{99,35 + 98,79 + 100,74}{3} = 99,62 \% \quad (19)$$

$$\eta_{dyn_{FLC}} = 99,62 \% \quad (20)$$

$$X_{ANN/P\&O} = P\&O_{[13]} \cdot \frac{ANN_{[17]}}{P\&O_{[17]}} = 98,85 \cdot \frac{99,05}{97,52} = 100,40 \% \quad (21)$$

$$X_{ANN/INC} = INC_{[13]} \cdot \frac{ANN_{[17]}}{INC_{[17]}} = 98,73 \cdot \frac{99,05}{97,96} = 99,82 \% \quad (22)$$

$$X_{ANN/OV} = OV_{[13]} \cdot \frac{ANN_{[17]}}{OV_{[17]}} = 94,56 \cdot \frac{99,05}{92,00} = 101,80 \% \quad (23)$$

$$X_{ANN/SC} = SC_{[13]} \cdot \frac{ANN_{[17]}}{SC_{[17]}} = 90,72 \cdot \frac{99,05}{96,00} = 93,60 \% \quad (24)$$

$$\bar{X} = \frac{100,40 + 99,82 + 101,80}{3} = 100,67 \% \quad (25)$$

$$\eta_{dyn_{ANN}} = 100,67 \% \quad (26)$$

Jak je patrné z výše popsaného, výpočet účinností metod FLC a ANN bude zatížen chybou. Hlavním důvodem jsou rozdílné testovací průběhy, respektive použití 14 různých typů průběhů v [13], s rozdílnými velikostmi G a rozdílnými tvary průběhů, a neznámým průběhem u [17]. Mimo jiné také použití jiného solárního panelu. Dále je nutné zohlednit, že v [17] jsou použity pouze malé hodnoty G, oproti [13], kde se pohybují v rozsahu od 0 W/m² do 1000 W/m², jak bylo dříve uvedeno, účinnosti algoritmů se liší i s ohledem na velikost G, respektive plochost PV křivky.

Z důvodu nepřesnosti při přepočtu je nutné brát vypočtené účinnosti pro algoritmy FLC a ANN pouze jako orientační. Proto, abychom mohli z dané analýzy vyvozovat odpovídající závěry, bylo nutné provést měření všech algoritmů najednou při stejných podmínkách.

4.2. Účinnost algoritmů při konstantním G, η_{stat}

V minulé kapitole jsme popsali účinnosti jednotlivých algoritmů při rychlých změnách intenzity slunečního záření. V této kapitole se zaměříme na schopnost sledování bodu maxima při konstantní hodnotě G. Tento údaj bude využit ve dvou případech. Za první při stanovení poměru přechodných jevů a konstantních stavů u dne s proměnlivou oblačností. A za druhé bude tento údaj použit jako účinnost pro jasné dny.

Jako základ použijeme data z [9], kde jsou uvedeny účinnosti několika algoritmů při konstantní hodnotě intenzity slunečního záření. Bohužel vylepšené metody P&O a INC, použité v [9], se neshodují s vylepšenými metodami použitými v [13], respektive u INC není uvedeno, o jaký typ vylepšené metody se jedná. Tím pádem dostáváme relativní data jen pro 4 typy algoritmů, a to pro, P&O, INC, FLC, a CV, která by měla odpovídat variantě bez MPPT z [9]. Pro další metody je tedy nutné použít přepočet. Metodologie bude stejná jako v předchozím případě.

Pro účinnost ANN byla využita data z [18], kde je provedeno porovnání ANN a FLC při dvou hodnotách konstantního G a to 1000 W/m² a 250 W/m². ANN dosáhlo celkové získané energie 100,57 kW resp. 22,6 kW oproti FLC, které bylo schopné získat 96 kW resp. 22 kW. Přepočtená účinnost ANN na hodnoty z [9] je 102,85 %.

$$ANN_{[9]} = FLC_{[9]} \cdot \frac{ANN_{[18]_{1000W/m^2}}}{FLC_{[18]_{1000W/m^2}}} = 99,14 \cdot \frac{100,57[kWh]}{96,00[kWh]} = 103,86 \% \quad (27)$$

$$ANN_{[9]} = FLC_{[9]} \cdot \frac{ANN_{[18]_{250W/m^2}}}{FLC_{[18]_{250W/m^2}}} = 99,14 \cdot \frac{22,6 [kWh]}{22,0 [kWh]} = 101,84 \% \quad (28)$$

$$\bar{X} = \frac{103,86 + 101,84}{2} = 102,85 \% \quad (29)$$

$$\eta_{stat_{ANN}} = 102,85 \% \quad (30)$$

Pro porovnání metod OV a SC byla použita data z [19]. Kde je uvedeno, že účinnost těchto dvou algoritmů při konstantní hodnotě G je menší jak 92,9 %, případně 90 %, zde je poněkud zavádějící, že ve stejné práci se objevují dva rozdílné údaje. Pro naše výpočty tedy budeme uvažovat účinnost cca 87 % pro oba typy algoritmů.

Pro teplotní metody TP a TG jsem bohužel žádné údaje o účinnosti při konstantní hodnotě slunečního záření nenašel. Vzhledem k tomu, že však pro určení U_{MPP} používají také poměry U_{OC} a U_{MPP} , jako je tomu u metody OV, plus navíc berou v potaz vliv teploty, což by mělo vést k větší přesnosti, odhadl jsem jejich účinnost na cca 90 %.

Informace o účinnostech upravených metod P&O a INC se najít nepodařilo. Shrnutí všech statických účinností je k nalezení v následující tabulce.

	CV	SC	OV	P&Oa	P&Ob	P&Oc	ICa	ICb	TG	TP	FLC	ANN
Pořadí	12	9	8	5	4	11	6	3	10	7	2	1
$\eta_{MPPT,stat}$	66,15%	87,00%	87,00%	96,98%	-	-	97,00%	-	90,00%	90,00%	99,22%	102,82%

Tabulka 3 - Statické účinnosti algoritmů

4.3. Porovnání η_{dyn} a η_{sta} po přepočtu

Jak můžeme pozorovat z tab. 4 pro téměř všechny algoritmy, vychází statická účinnost horší než dynamická, což by vzhledem k teoretickým předpokladům platit nemělo. Jedinou výjimkou je ANN. Nejmarkantnější je rozdíl u CV, kde tvoří cca 15 % ve prospěch dynamické metody. To by mohlo být způsobeno záměnou dvou rozdílných variant provedení, jelikož v [9] je uvedeno použití bez jakéhokoli MPPT, což jsem považoval za metodu odpovídající CV z [13]. Nicméně rozdíl je u jiných algoritmů např. INC a P&O, u kterých také vychází dynamická účinnost vyšší než ta statická, tato skutečnost bude způsobena nejspíše tím, že jednotlivá data nepochází z jednoho měření, ale z více zdrojů. Bohužel se mi nepodařilo najít žádný zdroj, ve kterém by byly provedeny současně testy dynamické a statické účinnosti pro větší počet algoritmů. Stejně tak hodnoty pro SC, OV, TG a TP jsou převzaty z jiného zdroje než referenční [9] a neodpovídají teoretickým předpokladům.

Z tohoto důvodu jsem se rozhodl použít pouze data z [9], kde jsou uvedeny jak účinnosti dynamické, tak statické. Nevýhodou však je, že měření bylo provedeno jen pro 6 algoritmů, a dále to, že dynamická účinnost byla měřena pouze při jednom typu průběhu (rampa) oproti 14

různým průběhům použitým v [13]. Tím pádem se dá předpokládat, že údaje z [9] nebudou tak přesné jako ty z [13]. Dalším problémem je, že hlavním úkolem této práce mělo být právě zhodnocení účinnosti co nejvíce algoritmů při rychlých změnách intenzity ozáření. Nicméně, jak bylo popsáno výše, z důvodu nemožnosti získání relevantních dat a nesouladu přepočtu s teorií, bylo nakonec přistoupeno k použití sice méně přesných, ale porovnatelných dat z [9], pro menší množství algoritmů.

Z [9] byly pro η_{dyn} použity hodnoty rychlejších změn intenzity záření, jelikož více odpovídají změnám popsaným v předchozí části této práce, a to zejména v strmosti změny G , tedy $W \cdot m^{-2}/s$. Jedná se o průběh typu rampa, G se mění z $1000 W/m^2$ na $1500 W/m^2$ za dobu 2,5 s. Tento průběh můžeme sledovat na obr. 24.

Do konečného porovnání byly vybrány jen 4 algoritmy, jelikož vylepšená metoda P&O dosahovala horších účinností než metoda klasická. Vylepšená varianta se dá implementovat pouze v digitálním provedení, a jelikož klasická metoda se dá použít jak v provedení analogovém, tak digitálním a za předpokladu stejné ceny za digitální implementaci pro obě varianty, je jasné, že z důvodu menší účinnosti by vylepšená varianta nikdy nemohla dosáhnout lepších výsledků.

Vylepšenou variantu INC jsem neuvažoval ze dvou důvodů. Jednak proto, že není nijak blíže specifikováno o jaké vylepšení metody INC se jedná, což už samo o sobě zakládá na nemožnost budoucího porovnání s jinými variantami, a také proto, že by bylo těžké stanovit rozdílové parametry pro odhad ceny za řídicí část obvodu, a tím pádem stanovit cenu za měnič. Dále také ze stejného důvodu jako u vylepšené P&O metody. Zde sice pro η_{dyn} dosahuje vylepšená metoda o jednu setinu vyšší účinnost, oproti tomu u statické účinnosti ztrácí pět setin procenta, a tím pádem nemůže nikdy dosáhnout lepších výsledků než metoda klasická.

Dále je uvažován vylepšený algoritmus P&O', který ovšem neodpovídá tomu z [9], nýbrž je odhadnut na základě dat z [11] – [13]. Jedná se o řešení s proměnnou velikostí posunu ΔU . Dynamická účinnost je volena s ohledem na data z [13] a je uvažována o cca 0,5 % větší než u klasické P&O, na základě [11] – [13] je pak pro statickou účinnost uvažována stejná změna jako u účinností dynamické, zde však jde pouze o odhad, jelikož v uvedených zdrojích nejsou uvedeny žádné konkrétní hodnoty. Při hodnocení této varianty je tedy nutné brát v úvahu, že se jedná o odhad.

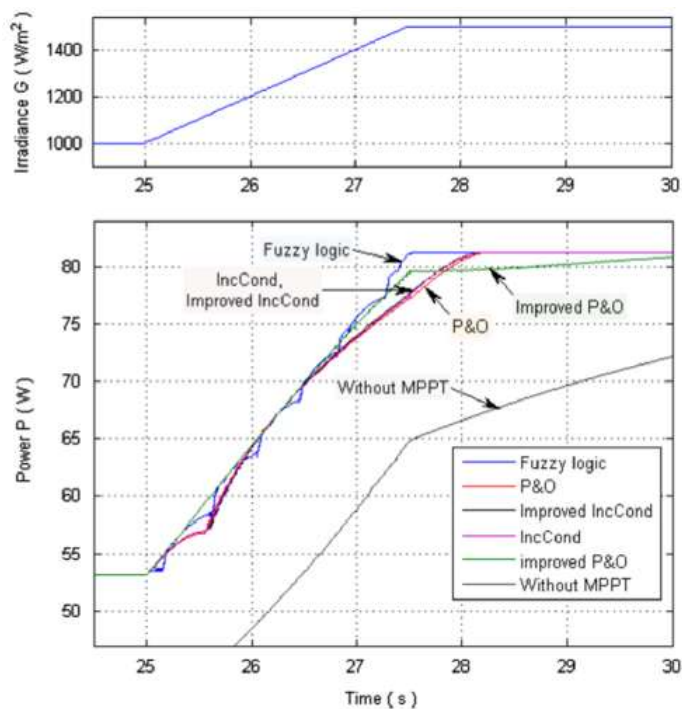
U varianty Bez MPPT je zajímavé poznamenat, že dynamická účinnost je vyšší než statická. To bude nejspíše způsobeno tím že, napětí, při kterém je z panelu odebírán proud, je nastaveno na určitou konstantní hodnotu, tedy určitý bod na VA křivce. Při změnách osvětlení se však proud zvětšuje či zmenšuje, napětí zůstává stejné, pohybuje se tedy i pracovní bod, který se může více blížit bodu maximálního výkonu.

Účinnost	CV [J]	SC [J]	OV [J]	P&Oa [J]	P&Ob [J]	P&Oc [J]	ICa [J]	ICb [J]	TG [J]	TP [J]	FLC [J]	ANN [J]
$\eta_{MPPT,dyn}$	79,51%	90,72%	94,56%	98,85%	99,29%	87,68%	98,73%	99,48%	90,18%	97,01%	99,62%	100,67%
$\eta_{MPPT,stat}$	66,15%	87,00%	87,00%	96,98%	-	-	97,00%	-	90,00%	90,00%	99,22%	102,82%

Tabulka 4 - Dynamické a statické účinnosti po přepočtu

	$\eta_{MPPT,stat}$	$\eta_{MPPT,dyn}$
FLC	99,22%	99,01%
P&O	96,98%	96,64%
P&O'	97,48%	97,14%
INC	97,00%	96,66%
Bez MPPT	66,15%	68,93%

Tabulka 5 - Nakonec použité dynamické a statické účinnosti algoritmů



Obrázek 23 - Použitý průběh pro stanovení η_{dyn} [9]

4.4. Výpočet celkové účinnosti algoritmů při různých typech dne, η_{MPPT}

V této části bude uveden postup, jakým byl získán jeden ze dvou údajů potřebných pro určení celkové účinnosti měniče, jedná se o celkovou účinnost MPPT, ta je složena z účinnosti dynamické a statické.

4.4.1. Jasný dny – typ A

Jak bylo uvedeno dříve, pro jasné dny bude použita přímo hodnota statické účinnosti. A to proto, že při tomto typu dne se intenzita slunečního záření mění jen velice pomalu, a zároveň nedochází k žádným rychlým změnám vlivem oblačnosti.

$$\eta_{MPPT,stat} = \eta_{MPPT,jasno} \quad (31)$$

4.4.2. Dny s proměnlivou oblačností - typy B a C

Nejzajímavější je situace u dnů s proměnlivou oblačností (polojasných dnů), kdy se hodnoty intenzity ozáření panelu mění velice rychle a značně. Pro stanovení účinnosti při tomto typu

dne byly analyzovány osvitová data z měření na UCCEB. Zde jsou uvedeny hodnoty intenzity ozáření panelu G, s časovým krokem 1 s, což nám dává dostatečnou přesnost pro analýzu rychlých změn. Úhel náklonu panelu vůči rovině země byl zvolen 30° jelikož nejvíce odpovídá reálné aplikaci solárních panelů.

Nejdříve bylo zapotřebí rozlišit dny, kdy se intenzita ozáření mění téměř neustále (typ B) a dny, které jsou sice polojasné ale změny jsou méně časté (typ C). Poté byl z osvitových dat určen poměr doby, kdy se dá G považovat za konstantní, odpovídá η_{stat} , a době rychlých změn, η_{dyn} . Z výsledných časů byl pak vypočítán poměr, který odpovídá celkové účinnosti MPPT při dnech s proměnlivou oblačností, a to jak pro typ dne s častými změnami, tak pro den s menším počtem změn, příklad výpočtu a detailnější popis rozlišování mezi konstantní a proměnným G viz další odstavce a vzorec (32), případně příloha 1. Podle této metodiky byl pak proveden výpočet pro každé roční období zvlášť.

Za konstantní byly považovány takové úseky, kde se během 20 s nezměnila intenzita ozáření o více než 100 W/m². Zbylé části byly považovány za proměnné a odpovídá jim tedy η_{dyn} . Poměry t_{stat} a t_{dyn} je možné pozorovat v tab. 6. I zde je však nutné upozornit na to, že hodnoty získané tímto postupem nebudou zcela přesné z důvodu uvažování t_{stat} na minimálně 20 s, a pro získání vyšší přesnosti by bylo nutné uvažovat kratší dobu, což v této práci nebylo možné, jelikož data byla analyzována „ručně“ bez použití jakéhokoli softwaru a zmenšení doby uvažované jako t_{stat} by vedlo k mnohonásobně větší době analýzy dat, jelikož je toto nutné provést pro všechny typy ročních období a zároveň pro čtyři typy dnů. Tento postupu analýzy dat byl použit z důvodu absence jakéhokoli softwaru, který by tento postup výpočtu uměl nahradit. Jednotlivé úseky je možné sledovat v příloze 1.

Je nutné uvést, že data pro výpočet byla získána pouze z malého počtu dní a nemusí mít proto přesnou vypovídající hodnotu. Analyzován byl pouze rok 2018, pro který se podařilo získat všechny potřebná data. Pro zpřesnění vstupních údajů by bylo nutné analyzovat větší počet let a provést následnou statistickou analýzu.

Pro výpočet celkové účinnosti algoritmu v polojasný den byl pak použit vzorec (32). Stejný postup byl použit pro všechna roční období. Pro letní období byl zvolen jako typický den s velkým počtem změn (typ B) 28.8.2018 a pro den s malým počtem změn (typ C) 21.8.2018. Pro jaro byly vybrány dny 23.5.2018 resp. 23.4.2018. Podzim 14.10.2018 a 19.10.2018. A zima 14.1.2018 a 23.1.2018. Tyto dny byly voleny, pokud možno, v prostředním měsíci daného ročního období, aby nejlépe zohledňovali rozdíly mezi prvním a posledním měsícem období, v důsledku čehož je zajištěna alespoň relativní přesnost výpočtů.

$$\eta_{MPPT, \text{polojasno}} = \frac{t_{stat} \cdot \eta_{stat} + t_{dyn} \cdot \eta_{dyn}}{t_{celkový}} \quad (32)$$

4.4.3. Zatažené dny – Typ D

Jinak je tomu u oblačných dnů, kde je sice intenzita slunečního záření málo proměnlivá, nicméně už se nedá považovat čistě za konstantní. Také je nutno poznamenat, že účinnost algoritmů se při různých hodnotách konstantního G liší [12] („plochost“ PV křivky). Bohužel se mi nepodařilo sehnat žádná data, díky kterým bych tento rozdíl v účinnosti mohl zohlednit. Po analýze osvitových dat z UCCEB jsem zjistil, že, u tohoto typu dne dochází k pravidelným

změnám intenzity G , nicméně změny nejsou zdaleka tak časté, a zejména rychlé jako u polojasných dnů, a zároveň se zde objevují dlouhé intervaly s téměř konstantními hodnotami. Nutné je ještě poznamenat, že průběhy se liší v závislosti na ročním období. Například v zimě se denní maxima G pohybují jen kolem 100 W/m^2 , a proto i strmosti změn dosahují malých hodnot. Proto bylo nutné zohlednit rozdíly mezi ročními obdobími, a to z hlediska velikosti změny G . Pro léto bylo ponecháno 100 W/m^2 , pro jaro a podzim pak 75 W/m^2 a pro zimu 20 W/m^2 , vše znovu za dobu 20 s. Účinnost byla vypočítána stejně jako je tomu u polojasných dnů. I přes tuto úpravu velikosti změn však značně převažuje doba s velmi pomalu se měnícím nebo téměř konstantním G . Poměry pro jednotlivá roční období jsou uvedena v tab. 6. Jak vidíme, i pro léto kde jsou rozdíly největší, dosahuje poměr η_{stat} více než 97 %, pro zimu se hodnoty pohybují dokonce nad 99 %. Při zaokrouhlení účinnosti na dvě desetinná místa, tak jak je používáno v této práci, nám pak u všech ročních období s výjimkou léta vychází účinnost u zataženého dne stejná jako účinnost statická, resp. účinnost pro jasný den.

4.4.4. Zhodnocení poměrů t_{stat} a t_{dyn}

Jak můžeme pozorovat, účinnost pro jasné dny je pro všechna roční období stejná. Dále vidíme, že pro dny s proměnlivou oblačností, typ B a C, jsou poměry mezi t_{stat} a t_{dyn} zhruba 44-47 % ku 53-56 % u dnů s velkým počtem změn, a 68-76 % ku 23-32 % u dnů s málo častými změnami. Největší podíl t_{dyn} je pro oba typy dnů v letním období, z tohoto důvodu je i účinnost v tomto ročním období nejmenší. Z důvodu zaokrouhlení výsledků na dvě desetinná místa však někdy nejde pozorovat rozdíl mezi jednotlivými ročními obdobími i přesto, že doby t_{stat} a t_{dyn} jsou rozdílné. Pro zatažené dny, je pak pro většinu případů $\eta_{\text{MPPT, zataženo}}$ skoro stejné jako η_{stat} a to z důvodu značné převahy t_{stat} nad t_{dyn} . Celkový přehled můžeme pozorovat v tab. 6.

	Algoritmus	Typ dne			
		A	B	C	D
jaro	FLC	99,22%	99,11%	99,16%	99,22%
	P&O	96,98%	96,79%	96,88%	96,97%
	P&O'	97,48%	97,29%	97,38%	97,47%
	INC	97,00%	96,81%	96,90%	96,99%
	Bez MPPT	66,15%	67,67%	66,94%	66,21%
	t_{stat}	100,00%	45,36%	71,52%	97,69%
	t_{dyn}	0,00%	54,64%	28,48%	2,31%

	Algoritmus	Typ dne			
		A	B	C	D
léto	FLC	99,22%	99,10%	99,15%	99,21%
	P&O	96,98%	96,79%	96,87%	96,97%
	P&O'	97,48%	97,29%	97,37%	97,47%
	INC	97,00%	96,81%	96,89%	96,99%
	Bez MPPT	66,15%	67,69%	67,04%	66,23%
	t_{stat}	100,00%	44,44%	68,03%	97,07%
	t_{dyn}	0,00%	55,56%	31,97%	2,93%

	Algoritmus	Typ dne			
		A	B	C	D
podzim	FLC	99,22%	99,11%	99,16%	99,22%
	P&O	96,98%	96,80%	96,89%	96,97%
	P&O'	97,48%	97,30%	97,39%	97,48%
	INC	97,00%	96,82%	96,91%	96,99%
	Bez MPPT	66,15%	67,64%	66,90%	66,20%
	t _{stat}	100,00%	46,31%	73,04%	98,36%
	t _{dyn}	0,00%	53,69%	26,96%	1,64%

	Algoritmus	Typ dne			
		A	B	C	D
zima	FLC	99,22%	99,11%	99,17%	99,22%
	P&O	96,98%	96,80%	96,90%	96,98%
	P&O'	97,48%	97,30%	97,40%	97,48%
	INC	97,00%	96,82%	96,92%	97,00%
	Bez MPPT	66,15%	67,62%	66,80%	66,17%
	t _{stat}	100,00%	47,13%	76,52%	99,27%
	t _{dyn}	0,00%	52,87%	23,48%	0,73%

Tabulka 6 - Účinnosti algoritmů při jednotlivých typech dnů a ročních obdobích,

A – jasný den, B – proměnlivá oblačnost, časté změny, C – proměnlivá oblačnost, menší počet změn, D – zatažený den

4.5. Porovnání účinností algoritmů u jednotlivých typů dní

Dále bych rád ukázal rozdíly v účinnostech jednotlivých algoritmů při různých typech dne. Popis bude proveden pro letní období, jelikož jsou zde největší rozdíly. Nicméně v porovnání s ostatními ročními obdobími se hodnoty příliš neliší. Vypočtené hodnoty můžeme pozorovat v tab. 7.

Jak vidíme, nejlepších hodnot dosahuje v každém typu dne algoritmus FLC a je tedy použit jako reference. Oproti ostatním algoritmům má o cca 2 % lepší účinnost. Dále můžeme pozorovat, že P&O a INC mají téměř stejnou účinnost, lišící se jen o 2 setiny procenta. Nejhorších výsledků dosahuje varianta bez MPPT.

Ze získaných dat můžeme dále pozorovat, že pro jasné a zatažené dny jsou rozdíly v účinnosti jednotlivých algoritmů v podstatě stejné. Největší rozdíly se pak vyskytují v dnech typu B, tedy proměnlivá oblačnost s častými změnami, kde dosahují rozdíly oproti jasným a zataženým dnům hodnot cca jedné desetiny procenta. Dny typu C, proměnná oblačnost s menším výskytem změn, se pak oproti A a D liší zhruba o pět setin procenta.

Varianta bez MPPT zaostává za referenčním algoritmem, FLC, vždy nejméně o 30 %. Což představuje značné ztráty v získané energii a předpokládám, že tento fakt bude mít za následek naprostou nerentabilitu tohoto typu řešení.

Dále jsem vypočetl orientační celkovou účinnost měniče, tedy je zde započítána i účinnost přeměny z DC na AC. Bližší popis metodiky výpočtu a podrobnější informace o celkové účinnosti měniče jsou uvedeny v kap. 5, pro správné pochopení tohoto odstavce tedy doporučuji nejdříve prostudovat informace uvedené v dané kapitole. Jako účinnost přeměny byla zvolena hodnota 96 %, a to z důvodu, že v jejím okolí se nejčastěji pohybuje účinnost přeměny DC/AC daného měniče, viz. účinnostní křivka, obr. 28. Zde je uvedeno porovnání pouze pro měnič malého výkonu, měniče s vyšším výkonem dosahují lepší účinnosti konverze, a proto by byl rozdíl mezi η_{MPPT} a $\eta_{celková}$ menší, než u měniče pro malý výkon. Jelikož jsme vybrali absolutní hodnotu této účinnosti, avšak $\eta_{conv} = f(P)$, tak se jedná pouze o ilustrační hodnoty, které ukazují hlavně to, že celková účinnost je menší než účinnost MPPT a to zhruba o jednu desetinu procenta. Dále v práci a při použití výpočtů v programu SAM je už samozřejmě použita účinnost konverze jako funkce výkonu.

Jasno - typ A					
	FLC	P&O	P&O'	INC	Bez MPPT
η_{MPPT}	99,22%	96,98%	97,48%	97,00%	66,15%
$\Delta \eta_{MPPT}$	0%	-2,24%	-1,74%	-2,22%	-33,07%
$\eta_{celková}$	95,25%	93,10%	93,58%	93,12%	63,50%
$\Delta \eta_{celková}$	0%	-2,15%	-1,67%	-2,13%	-31,75%

Polojasno - časté změny - typ B					
	FLC	P&O	P&O'	INC	Bez MPPT
η_{MPPT}	99,10%	96,79%	97,29%	96,81%	67,69%
$\Delta \eta_{MPPT}$	0%	-2,31%	-1,81%	-2,29%	-31,41%
$\eta_{celková}$	95,14%	92,92%	93,40%	92,94%	64,98%
$\Delta \eta_{celková}$	0%	-2,22%	-1,74%	-2,20%	-30,15%

Polojasno - málo změn - typ C					
	FLC	P&O	P&O'	INC	Bez MPPT
η_{MPPT}	99,15%	96,87%	97,37%	96,89%	67,04%
$\Delta \eta_{MPPT}$	0%	-2,28%	-1,78%	-2,26%	-32,11%
$\eta_{celková}$	95,18%	93,00%	93,48%	93,01%	64,36%
$\Delta \eta_{celková}$	0%	-2,19%	-1,71%	-2,17%	-30,83%

Oblačno - typ D					
	FLC	P&O	P&O'	INC	Bez MPPT
η_{MPPT}	99,21%	96,97%	97,47%	96,99%	66,23%
$\Delta \eta_{MPPT}$	0%	-2,24%	-1,74%	-2,22%	-32,98%
$\eta_{celková}$	95,24%	93,09%	93,57%	93,11%	63,58%
$\Delta \eta_{celková}$	0%	-2,15%	-1,67%	-2,13%	-31,66%

Tabulka 7 - Porovnání účinností algoritmů pro jednotlivé typy dne při letním období

4.6. Výpočet celkové roční účinnosti MPPT

Pro výpočty v následné ekonomické analýze je nutné zohlednit počet jednotlivých typů dnů za rok a také období, ve kterém se tyto dny vyskytují. Bylo použito zjednodušení a neuvažujeme jednotlivé měsíce, ale pouze roční období. Průměrné počty jednotlivých typů dnů jsou v následující tabulce. Při použití výpočtu ekonomické návratnosti, tak jak je použit v této práci, pro jinou lokalitu, by bylo potřeba zohlednit tamější klimatické podmínky.

V této práci je dále počítáno s celkovou roční účinností algoritmu, ta je vypočítána na základě několika parametrů a to: účinností při jednotlivých typech dnů a dále počtem těchto dnů za rok. Jak bylo popsáno výše, nejdříve proběhlo rozlišení 4 základních typů dne, dále byl proveden výpočet účinnosti algoritmu v daný typ den, a nakonec byl stanoven počet jednotlivých dnů za rok. Z těchto údajů byla poté vypočtena celková roční účinnost algoritmu. Nejdříve byla počítána účinnost algoritmu při jednotlivých ročních obdobích. Výpočet proběhl podle vzorce (33), a poté byla vypočtena celková roční účinnost algoritmu jako aritmetický průměr účinností jednotlivých ročních období, vzorec (34). Tato celková roční účinnost, respektive ztráty, pak budou použity při výpočtu celkové získané roční energie, což bude jeden z vstupních parametrů pro následnou ekonomickou analýzu. Z tab.9 vidíme, že rozdíly v účinnosti mezi pokročilou variantou FLC a ostatními algoritmy se pohybuje zhruba kolem 3 %.

$$\eta_{MPPT,roční\ období} = \frac{\sum_0^3(\eta_i \cdot N_i)}{N_c} \quad (33)$$

$$\eta_{MPPT,celková\ roční} = \frac{\sum_0^3 \eta_{MPPT,roční\ období}}{4} \quad (34)$$

Kde:

η_i – účinnost při daném typu dne

N_i – počet tohoto typu dne za dané roční období

N_c – celkový počet dní za dané roční období

	Typ dne			
	A	B	C	D
jaro	18	45	25	4
léto	19	39	30	4
podzim	19	23	30	19
zima	16	16	33	26
celkem	72	123	118	53

Tabulka 8 - Počet jednotlivých typů dnů za rok

A-jasno, B-proměnlivá oblačnost, časté změny, C-proměnlivá oblačnost, málo změn, D-zataženo

Algoritmus	Roční období				celková roční η_{MPPT}
	jaro	léto	podzim	zima	
FLC	99,15%	99,15%	99,17%	99,18%	99,16%
P&O	96,86%	96,86%	96,90%	96,92%	96,89%
P&O'	97,36%	97,36%	97,40%	97,42%	97,39%
INC	96,88%	96,88%	96,92%	96,94%	96,91%
Bez MPPT	67,11%	67,10%	66,78%	66,65%	66,91%

Tabulka 9 - Účinnosti pro jednotlivé roční období, celková roční účinnost

Algoritmus	celková roční η_{MPPT}	Ztráty
FLC	99,16%	0,84%
P&O	96,89%	3,11%
P&O'	97,39%	2,61%
INC	96,91%	3,09%
Bez MPPT	66,91%	33,09%

Tabulka 10 - Celková roční účinnost MPPT, potažmo ztrát

5. Popis jednotlivých částí měniče a jeho celková účinnost η_c

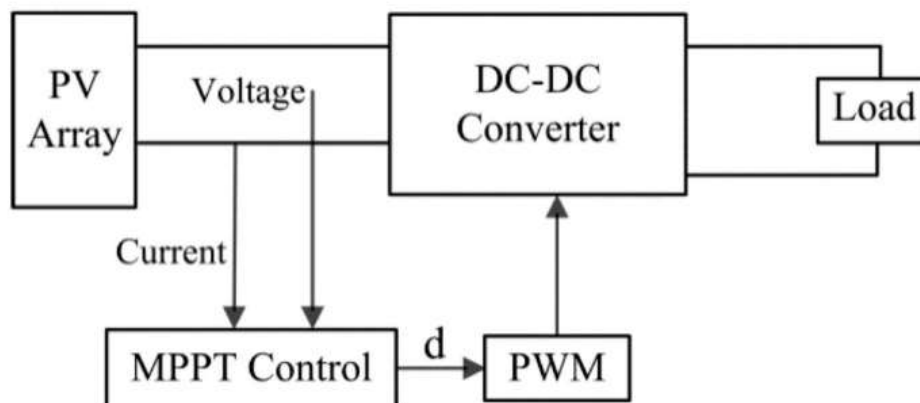
5.1. Hardwarové uspořádání měniče

5.1.1. Dvou stupňový měnič – beztransformátorový

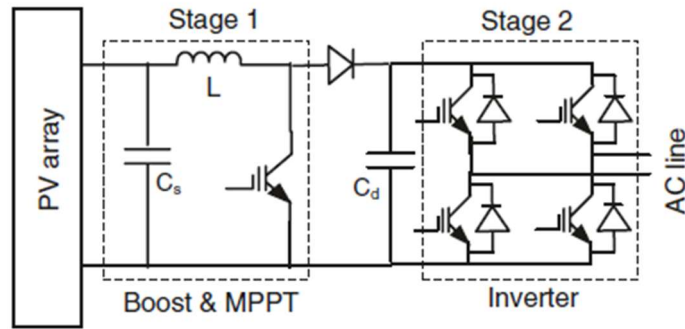
Tento měnič se ve skutečnosti skládá ze dvou měničů, které jsou však součástí jednoho obvodu. Jedná se o DC/DC měnič, který upravuje výstupní napětí solárního zdroje na požadovanou hodnotu, tedy MPPT. Druhá část zajišťuje konverzi z DC na AC.

První část obvodu, DC/DC, může být koncipována třemi způsoby: step-up měnič (boost converter), který zvyšuje výstupní napětí FV zdroje, step-down měnič (buck converter, chopper), který naopak snižuje výstupní napětí a nebo univerzální měnič (universal converter), který je schopný výstupní napětí jak zvyšovat, tak snižovat. Na obr. 26 můžeme pozorovat základní schéma jednofázového dvou stupňového měniče se step-up částí. Tato první část obvodu se také stará o sledování bodu maxima, bližší vysvětlení v následujícím odstavci. V druhé části obvodu se nachází můstek (full-bridge, H-bridge) složený ze 4 tranzistorů, obvykle se používají IGBT nebo MOSFET, a 4 diod. Různé vylepšení tohoto obvodu pro zlepšení účinnosti měniče byly představeny v [20]. V této práci je popsáno pouze jednofázové provedení střídačové části obvodu, třífázové řešení by obsahovalo navíc další dva tranzistory a diody.

Sledování bodu maxima tedy zajišťuje stejnosměrná část obvodu, přesněji výkonový tranzistor. Ten se chová jako proměnná impedance, v závislosti na spínacím signálu, a tím je schopný regulovat napětí při, kterém odebírané z FV zdroje proud a držet tak bod maximálního výkonu, viz. tvar VA, resp. PV křivka. Výstupem MPPT je pak řídicí signál D vysílaný na gate tranzistor.



Obrázek 24 - Schéma řízení měniče pomocí MPPT, [8]

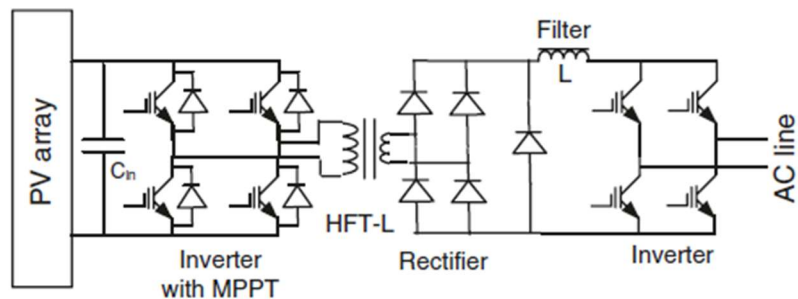


Obrázek 25 - Obvodové schéma dvou stupňového měniče, [22]

5.1.2. Třístupňový měnič – s transformátorem

Další variantou je měnič s transformátorem, toto řešení můžeme považovat za tři stupňové. Schéma tohoto měniče můžeme pozorovat na obr. 27. Jak vidíme, nejdříve dochází k přeměně DC/AC, dále je zařazen transformátor, poté usměrňovač a poté znovu dochází ke konverzi z DC na AC.

Transformátor se zařazuje z důvodu galvanického oddělení FV zdroje od elektrizační sítě. Použité transformátory se konstruují jako vysokofrekvenční, a to z důvodu snížení spotřeby materiálu, a tím pádem i snížení ceny. Z toho plynou také menší rozměry přístroje [20], [21]. Z výše popsaného je zřejmé, že měniče s transformátory dosahují menších účinností než měniče beztransformátorové. Rozdíly v účinnostech bývají zhruba 2 %, beztransformátorové měniče dosahují maximální účinností kolem 96-98 % oproti tomu řešení s transformátorem cca 94-96 % [22].



Obrázek 26 - Obvodové schéma třístupňového měniče, [22]

5.1.3. Porovnání a uvedení předpokladů pro další část práce

V dnešní době jsou měniče s transformátory na ústupu [22], a to zejména z důvodu jejich horší účinnosti. Další nevýhodou je vyšší cena způsobená větším počtem součástek a přítomností samotného transformátoru. V budoucnu se tedy předpokládá přechod na beztransformátorové měniče. V další části práce se tedy budeme zabývat výhradně beztransformátorovými měniči.

Dále se budeme tedy zabývat pouze dvoustupňovým typem měniče. Pro další úvahy rozdělíme obvod měniče na dva celky, které odpovídají rozdělení v [20] a to řídicí část obvodu, na obr. 26 označena jako Stage 1, a na část „silovou“, popřípadě střídačovou, která je na obr. 26 označena jako Stage 2. Řídicí část obvodu pak zajišťuje sledování bodu maxima a zbylá část se stará o konverzi z DC na AC.

5.2. Účinnost střídače, $\eta_{\text{střídače}}$

Druhým zásadním parametrem pro výpočet celkové účinnosti měniče je účinnost přeměny DC/AC. Podle normy je tato účinnost stanovena podle vzorce (35). Popis jednotlivých částí obvodu střídače je k nalezení výše. Pro zjednodušení uvažujeme měnič jako dvoustupňový. Účinnost střídače závisí na různých typech ztrát. Nejvýraznější jsou Jouleho ztráty způsobené protékajícím proudem. Dále pak spínací ztráty na vypínatelných součástkách (tranzistory), ztráty při komutaci a další [21]. Velký význam má pak také to, zdali se jedná o měnič bez či s transformátorem.

$$\eta_{\text{střídače}} = \frac{\int_0^T p_{AC}(t) dt}{\int_0^T p_{DC}(t) dt} \quad (35)$$

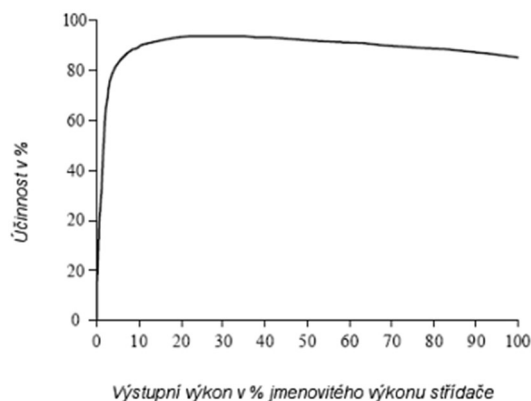
Kde:

$$\int_0^T p_{AC}(t) dt - \text{výkon na výstupu střídače}$$
$$\int_0^T p_{DC}(t) dt - \text{výkon na výstupu z MPPT} = \text{výkon na vstupu do střídače}$$

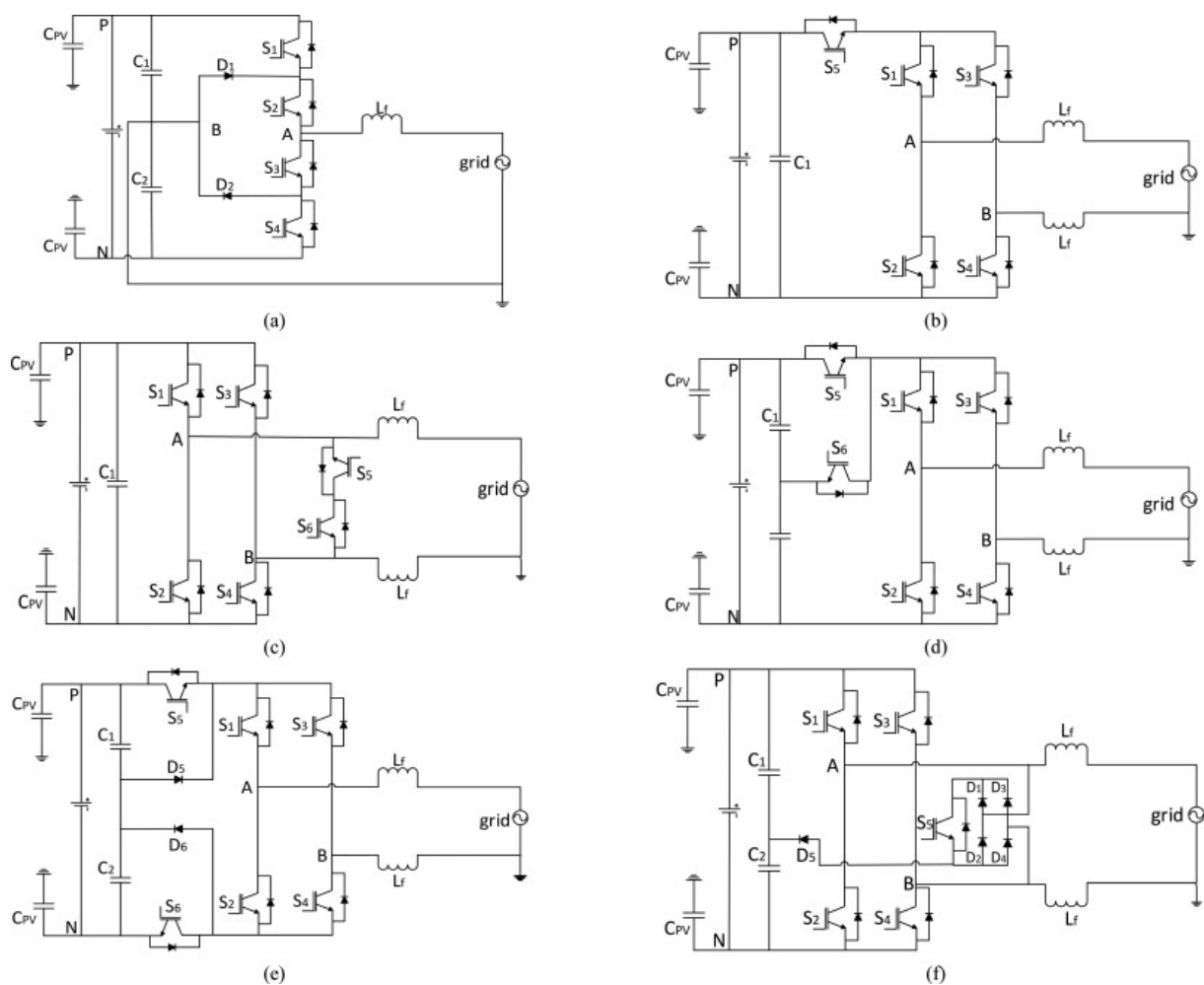
Jak bylo uvedeno výše, účinnost střídače není konstantou, ale funkcí, přesněji $\eta_{\text{střídače}} = f(P)$. Účinnost konverze tedy závisí na tom, jaké procento nominálního výkonu střídače je zrovna FV zdrojem dodáváno. Účinnostní křivku můžeme pozorovat na obr. 28. Dnes používané beztrasformátorové měniče dosahují maximální účinnosti konverze až 98 % [22].

Dále bude uvažován především jednofázový beztrasformátorový měnič. Jelikož má práce je zaměřena zejména na řídicí část obvodu měniče, MPPT, nebudu se zde proto více zabývat problematikou střídačů. Pro přehled pouze uvedu některé nejvíce používané obvodové schémata jednofázových střídačů, obr. 29. Jedná se celkem o 6 provedení a to: a) Diode-clamped, b) H5, c) HERIC, d) oH5, e) H6, f) HBZVR. Zdrojem dat je [23], zde proběhla nejdříve simulace a poté i experimentální ověření. Bohužel je zde uvedena účinnost pouze pro rozsah od 100 W do 1 kW. Průběhy můžeme pozorovat na obr. 30.

Dále je v práci, při výpočtu dodané energie systémem, použit stejný typ měniče pro všechny algoritmy, tím pádem je stejné i schéma silové části. Byl použit střídač ABB PVI 5000-TL-OUTD, bohužel se nepodařilo zjistit, který typ silového ani řídicího obvodu byl použit. Při výpočtu je samozřejmě uvažována účinnost střídače jako funkce výkonu.

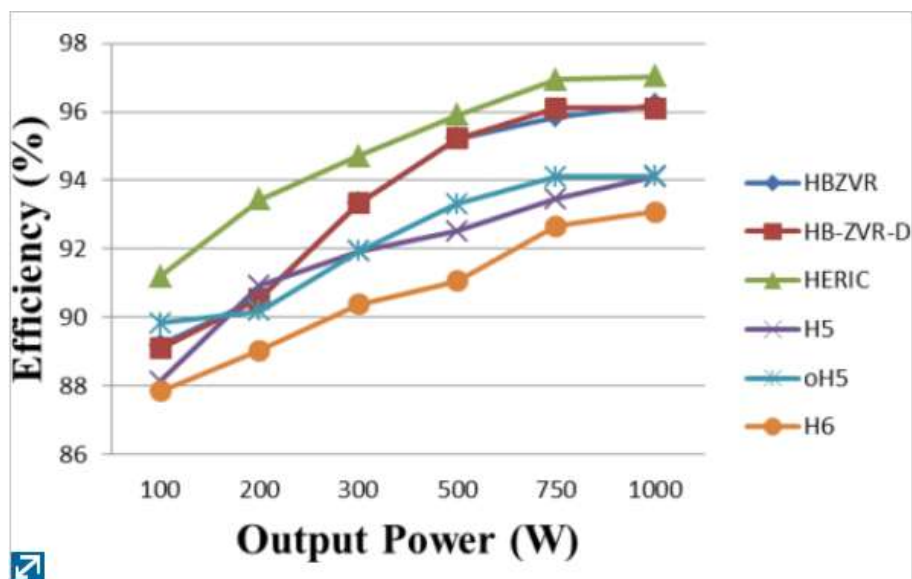


Obrázek 27 - Účinnostní křivka měniče, [24]



Obrázek 28 - Obvodové schémata střídačů, [22]

a) Diode-clamped, b) H5, c) HERIC, d) oH5, e) H6, f) HBZVR



Obrázek 29 - Průběhy účinností jednotlivých obvodových řešení 1-f beztransf. střídače, [22]

5.3. Celková účinnost měniče, $\eta_{\text{celková}}$

Jak již bylo dříve uvedeno, celková účinnost měniče je závislá na dvou parametrech, a to jednak účinnosti MPPT, η_{MPPT} , a za druhé účinnosti konverze stejnosměrné složky na složku střídavou, $\eta_{\text{střídače}}$. Podle evropské normy EN 50530 je celková účinnost střídače definována vzorcem (36) [25]. Účinnost MPPT tedy ovlivňuje to, jaké množství energie se dostane na vstup střídače.

$$\eta_{\text{celková}} = \eta_{\text{MPPT,stat}} \cdot \eta_{\text{střídače}} \quad (36)$$

Je však nutné poznamenat, že norma uvažuje pouze statickou účinnost MPPT. Úkolem této práce bylo především prozkoumání účinností jednotlivých MPPT při rychlých změnách intenzity slunečního záření. Byl tedy navrhnout postup, jak do celkové účinnosti měniče zahrnout i $\eta_{\text{dyn,MPPT}}$. Tento postup byl popsán v předchozí kapitole, kde je vypočtena celková roční účinnost, resp. ztráty MPPT. S tímto parametrem je pak nadále pracováno při výpočtu celkové roční výroby energie. Použití tohoto typu výpočtu pak tedy zohledňuje, oproti celkové účinnosti použité v normě, i účinnost dynamickou a z tohoto důvodu by měla přinést zpřesnění vstupních údajů uvažovaných při rozhodování o výběru použitého měniče. Je však nutné poznamenat, že pro výpočet je nutné znát vcelku přesná klimatická data pro daný region výstavby FV zdroje. To má za následek nemožnost generalizace tohoto údaje a tím pádem nebude moci být uváděn v datasheetu výrobku.

Použití tohoto složitějšího typu výpočtu by mělo smysl hlavně v místech s velkým výskytem přechodné oblačnosti. Zde by byl rozdíl oproti celkové účinnosti definované v normě největší a přispěl by tedy nejvíce k zpřesnění vstupních údajů pro rozhodování o ekonomické výhodnosti projektu. Pro regiony s vysokým zastoupením oblačných či jasných dnů by takovýto postup nepřinesl značný rozdíl ve vstupních údajích, a naopak by ve výsledku mohly náklady na výpočet této komplexnější účinnosti přesáhnout přínosy způsobené zvýšením přesnosti vstupních dat.

Norma [25] pak dále stanovuje také takzvanou EURO účinnost jako vážený průměr účinností při různých hodnotách výstupního výkonu vztahenému k jmenovitému výstupnímu výkonu měniče [25]. Výpočet probíhá podle vzorce (37). Koeficienty jsou voleny s ohledem na klimatické poměry v Evropě. Tento údaj bývá spolu s hodnotou maximální účinnosti udáván v datasheetech výrobců měničů.

$$\eta_{\text{EURO}} = 0,03 \cdot \eta_{5\%PN} + 0,06 \cdot \eta_{10\%PN} + 0,13 \cdot \eta_{20\%PN} + 0,1 \cdot \eta_{30\%PN} + 0,48 \cdot \eta_{50\%PN} + 0,2 \cdot \eta_{100\%PN} \quad (37)$$

5.4. Zhodnocení parametrů řídicí části obvodu na použitém algoritmu

Cena řídicí části obvodu měniče je závislá na několika parametrech specifických pro dané řešení. Jedná se o použitý hardware vyžadovaný pro správnou funkci daného řešení, poté náročnost implementace daného algoritmu a složitost vývoje určité varianty řešení. A dále také o benefity, které pramení z použití daného řešení.

Každý algoritmus vyžaduje pro svoje fungování určité vstupní hodnoty. Jedná se o senzory vstupních veličin. Zde rozlišujeme 4 základní čidla a to napěťové, proudové, teplotní a čidlo pro měření intenzity slunečního záření. Každý typ čidla má jinou pořizovací cenu. Dále záleží na tom, zdali se jedná o analogové či digitální řešení a s tím spojené součástky např. mikroprocesory a AD převodníky. Je také nutné zahrnout součástky, které jsou použité, jak pro analogové, tak digitální řešení např. RLC prvky, diody a tranzistory. Také je potřeba zohlednit obtížnost naprogramování řídicího algoritmu u digitálních řešení. Toto vše ovlivňuje komplexnost daného systému. Shrnutí daných parametrů je prezentováno v následující tabulce, která byla vyhotovena na základě [9], [12], [15], [26]. Podrobněji se pak analýzou ceny řídicí části obvodu zabývám v kapitole 6.

Název algoritmu	Senzory	Analog/Digital	Komplexnost řešení	Cena
ConstantVoltage (CV)	U	A	nejmenší	nízká
Open-circuitvoltage (OV)	U	A/D	malá	nízká
Short-circuitcurrent (SC)	I	A/D	malá	nízká
Temperature Gradient (TG)	U, T	A	střední	vysoká
TemperatureParametric (TP)	U, T, G	A	střední	vysoká
Perturb And Observe (P&O)	U, I	A/D	střední	střední
Incrementalconductance (INC)	U, I	D	vysoká	střední
Fuzzy Logiccontrol (FLC)	U, I	D	největší	vysoká
Artificialneuralnetwor (ANN)	U, I	D	největší	vysoká

Tabulka 11 - Přehled parametrů ovlivňujících cenu daného řešení

6. Vstupní parametry pro ekonomickou analýzu

V druhé části práce se zaměřuji na zhodnocení ekonomické výhodnosti jednotlivých řešení s danými algoritmy. A to z důvodu, že jak se již mnohokrát ukázalo, může být sice vymyšlena nějaká nová převratná technologie, nicméně pokud nebude ekonomicky výhodnější než stávající řešení, nelze předpokládat její reálné používání. K zhodnocení byly vybrány 3 modelové příklady. Zaprvé pořízení nového FV zdroje na střechu rodinného domu, uvažovaný instalovaný výkon 5 kWp. Dále pak výstavba nové velké komerční FVE, v této práci je volen instalovaný výkon 330 kWp. Nové zdroje takového typu se v současné době, v ČR, téměř vůbec nestaví, nicméně situace se začíná pomalu měnit a investoři znovu začínají uvažovat o výstavbě velkých FVE i za předpokladu nulových státních dotací. Jako poslední scénář byla uvažována výměna stávajícího měniče v již postavené a provozované FVE a jeho náhrada měničem s vyšší účinností.

6.1. Rozdíl ve vyrobené energii

Jak bylo popsáno dříve, jedním ze vstupů pro ekonomickou analýzu bude množství vyrobené energie za rok. Pro výpočet byl použit software SAM od společnosti NREL, který umožňuje přímo zadat, jako jeden z parametrů, ztráty způsobené nepřesností sledování bodu maximálního výkonu. Tento parametr se nám uplatní už v DC části obvodu viz definice η_{MPPT} . Díky použití stejného typu střídače pro všechny varianty, je pak tedy $\eta_{střídače}$ vždy stejná.

V programu SAM byl namodelován vzorový příklad fotovoltaického zdroje pro malé a velké instalované výkony, 5 kWp, resp. 300 kWp, kde tyto dvě varianty odpovídají rodinnému domu a komerční elektrárně. Jako solární panely byly použity SunPower SPR-250NX-BLK-D. Dále pro malé výkony byl zvolen střídač ABB PVI-5000-OUTD-US a pro velké výkony pak ABB PVI-300. Střídače od firmy ABB byly voleny z toho důvodu, že jako u jediných se mi podařilo zjistit jaký typ algoritmu u svých měničů používají. Tento údaj je pak použit v další kapitole pro stanovení odhadu ceny za zbylou část měniče. Dále je nutné zmínit, že pro variantu komerční elektrárny je dále uvažován střídač ABB PV-330.0-TL a nikoli ABB PVI-300, který byl použit v simulaci. Důvodem je právě fakt, že požadované informace se podařilo zjistit pouze k ABB PV-330.0-TL. Tyto měniče se však výkonově liší a bylo tedy nutné provést přepočty mezi hodnotami získanými ze simulace na hodnoty použité v této práci. Přepočty proběhly podle vzorce (38). Hodnoty ze simulace byly vynásobeny koeficientem k , který zohledňuje poměr mezi výkony daných měničů. Podobný případ nastal u měniče s malým výkonem, kde v simulaci byl použit ABB PVI-5000-OUTD-US oproti v práci dále uvažovanému ABB PVI-5000-TL-OUTD. Zde však byly výkony obou měničů stejné a nebylo tedy nutné provádět přepočty. Ostatní parametry zaměřovaných měničů byly téměř totožné, a proto došlo k zjednodušení a tyto drobné rozdíly byly zanedbány.

$$k = \frac{330}{300} = 1,11 \quad (38)$$

Jako lokalita výstavby FV elektrárny byla uvažována Praha či blízké okolí. Výpočet vyrobené energie byl proveden na základě typického roku, který odpovídá průměrným klimatickým podmínkám v daném region. Pro výrobu energie jsou uvažovány reálné podmínky a jsou proto zohledněny různé druhy ztrát a ne pouze ztráty způsobené nepřesností sledování bodu maxima. Mezi tyto ztráty řadíme např. ztráty způsobené zašpiněním panelu, Jouleho ztráty ve vodičích, ztráty na výkonových součástkách a další. Dále je uvažována degradace systému,

výroba energie je každý rok snížena o 0,5 % oproti roku předchozímu. Výstupem ze simulace je tedy množství systémem vyrobené energie za každý rok.

Životnost celého systému je odhadnuta na 20 let pro varianty nové výstavby, pro náhradu měniče, u již fungující elektrárny je předpokládána doba životnosti dalších cca 10 let, a to z důvodu uvažování uvedení zdroje do provozu v průběhu roku 2008. U této varianty jsou tedy brány hodnoty odpovídající 11 - 20 roku provozu FV zdroje ze simulace. Tabulka daných hodnot je uvedena dále v práci u příslušné podkapitoly.

Rok	Roční výroba zdroje 5kWp [kWh]				
	FLC	P&O	P&O'	INC	Bez MPPT
1	4 300	4 201	4 222	4 201	2 884
2	4 279	4 180	4 201	4 180	2 869
3	4 257	4 159	4 180	4 160	2 855
4	4 236	4 138	4 159	4 139	2 841
5	4 215	4 117	4 139	4 118	2 826
6	4 194	4 097	4 118	4 097	2 812
7	4 173	4 076	4 097	4 077	2 798
8	4 152	4 056	4 077	4 057	2 784
9	4 131	4 035	4 057	4 036	2 770
10	4 110	4 015	4 036	4 016	2 757
11	4 090	3 995	4 016	3 996	2 743
12	4 069	3 975	3 996	3 976	2 729
13	4 049	3 955	3 976	3 956	2 715
14	4 029	3 936	3 956	3 936	2 702
15	4 009	3 916	3 936	3 917	2 688
16	3 989	3 896	3 917	3 897	2 675
17	3 969	3 877	3 897	3 878	2 661
18	3 949	3 857	3 878	3 858	2 648
19	3 929	3 838	3 858	3 839	2 635
20	3 909	3 819	3 839	3 820	2 622

Tabulka 12 - Roční výroba zdroje 5kWp pro jednotlivé typy algoritmů

Rok	Roční výroba zdroje 330 kWp [kWh]				
	FLC	P&O	P&O'	INC	Bez MPPT
1	286 186	279 582	281 037	279 640	192 075
2	284 755	278 183	279 631	278 242	191 115
3	283 331	276 793	278 233	276 850	190 159
4	281 915	275 408	276 843	275 466	189 209
5	280 506	274 032	275 458	274 088	188 263
6	279 103	272 661	274 080	272 719	187 321
7	277 707	271 299	272 710	271 355	186 385
8	276 319	269 941	271 347	269 998	185 452
9	274 937	268 591	269 990	268 648	184 525
10	273 562	267 249	268 640	267 304	183 603
11	272 194	265 913	267 297	265 968	182 685
12	270 833	264 583	265 960	264 638	181 772
13	269 479	263 260	264 630	263 315	180 863
14	268 132	261 944	263 307	261 998	179 958
15	266 791	260 634	261 990	260 689	179 058
16	265 458	259 331	260 681	259 386	178 164
17	264 130	258 035	259 378	258 089	177 273
18	262 809	256 744	258 081	256 797	176 386
19	261 495	255 461	256 791	255 514	175 504
20	260 187	254 184	255 506	254 236	174 626

Tabulka 13 - Roční výroba zdroje 330 kWp pro jednotlivé typy algoritmů

6.2. Odhad ceny řídicí části měniče

Dalším vstupem pro ekonomickou analýzu je pořizovací cena měniče. Jak bylo zmíněno dříve, zadáním práce je ekonomické zhodnocení použitého algoritmu pro sledování bodu maximálního výkonu. Dále bylo popsáno, že námi uvažovaný měnič se skládá ze dvou částí, a to části stejnosměrné zajišťující sledování bodu maxima a druhé části, která je zodpovědná za přeměnu z DC na AC, tedy střídač. Tato druhá část je uvažována pro všechny algoritmy stejná. Jelikož výrobce udává pouze celkovou cenu za měnič a nikoli ceny za jednotlivé části měniče bylo nutné cenu řídicí části obvodu odhadnout.

Pro odhad hardwarové části byla použita data z [27], kde je uvedeno schéma step-up měniče, který používá algoritmus P&O, digitální provedení. Jedná se sice o měnič, který je používán pro napájení baterie a není zde tedy zapotřebí střídačové části, nicméně určitá část obvodu je stejná jako řídicí část obvodu u fotovoltaických měničů, a proto je možné tuto část použít pro zjištění použitých součástek. V dané práci je použit step-up měnič a všechny odhady jsou tedy prováděny pro tuto variantu řešení. U použitých měničů, ABB PVI-5000-TL-OUTD a ABB PVI-330.0-TL se však nepodařilo zjistit o jaké provedení DC části měniče se jedná. Je tedy uvažováno, že oba používají právě dané řešení z [27].

Daný obvod byl použit ve spojení s algoritmem P&O-D, nicméně stejné schéma by mohlo být použito i pro ostatní algoritmy s výjimkou varianty bez MPPT. Zde by stačilo pouze použití jedné diody zabraňující průtoku proudu v opačném směru. Dále je zde mírný rozdíl u varianty s P&O-A, kde není zapotřebí AD převodníků, a stačí pouze dva komparátory a jeden OZ navíc. Hlavním rozdílem v hardwarové části je použití daného mikroprocesoru, u variant bez MPPT a P&O-A není potřeba žádný, oproti tomu u zbylých třech variant zapotřebí je a liší se

požadovaným výkonem a tím pádem i cenou. Byly použita data z [27] – [29], kde je přímo uvedeno o typ jaký mikroprocesoru se jednalo a pro tyto pak byly nalezeny tržní ceny. Pro variantu P&O-D' potřebná data nalezena nebyla a cena mikroprocesoru tedy byla odhadnuta. Po konzultaci s vedoucím práce byly následně odhadnuty i ceny zbylých součástek. Pro variantu s vyšším výkonem bylo potřeba v řídicí části obvodu použít výkonnější tranzistor a diody. Zbylé součástky byly uvažovány stejně jako u varianty s malým výkonem.

Jako další krok bylo zapotřebí odhadnou přibližnou náročnost implementace a komplexnost vývoje řešení s daným algoritmem. Hodnoty v sekci náročnost jsou uvedeny jako dny potřebné pro implementování daného algoritmu. Uvažována pracovní doba byla 8 hod/den s mzdou 1000 Kč za hod. Tato částka byla zvolena po konzultaci s vedoucím práce. Stejná hodnota je uvažována v ekonomických analýzách některých velkých průmyslových podniků, např. u firmy ŠKODA AUTO. U metody P&O-A je nutné uvést, že jde o analogovou implementaci daného řešení. Komplexnost vývoje daného řešení je uvedena také ve dnech potřebných pro realizování projektu, pracovní doba a mzda jsou uvažovány stejně jako u náročnosti. U obou parametrů je ještě výsledná cena za práci podělena množstvím vyrobených kusů v dané výrobní sérii, uvažováno 1000 ks pro měniče malého výkonu a 400 ks pro měnič velkého výkonu. Hodnoty časové náročnosti byly odhadnuty po konzultaci s vedoucím práce a na základě tab. 7, která vychází z [9], [12], [15], [26].

Jako poslední byly zohledněny určité benefity spojené s daným typem řešení MPPT. Jedná se konkrétně o zobrazení daných veličin a údajů a o vzdálenou správu. Analogová provedení, tedy Bez MPPT a PO-A, tyto funkce nenabízejí a jsou tedy oproti ostatním variantám v tomto ohledu znevýhodněny. Proto byla po konzultaci s vedoucím práce přičtena k pořizovací ceně měniče částka 500 Kč za každou funkci pro variantu RD a 5000 Kč pro komerční elektrárnu. Výsledné tabulky použité pro stanovení ceny řídicí části obvodu viz. příloha 4 - 5.

Z dané tabulky byly vypočteny ceny za řídicí část obvodu pro každý typ algoritmu, tab. 15. Od firmy ABB se podařilo zjistit, že u svých měničů používají algoritmus P&O-D. Dále jsem tedy zvolil měnič, který výkonově odpovídá danému instalovanému výkonu FV zdroje a vyhledal jeho tržní cenu. Pro malé výkony byl použit měnič ABB PVI-5000-TL-OUTD a pro větší výkony pak ABB PVI 330.0. Z dané tržní ceny byla stanovena cena bez DPH, od té odečtena marže firmy, která byla po konzultaci s vedoucím práce odhadnuta na 15 %, z této ceny pak byla dále odečtena cena za řídicí část obvodu. Dále je nutné uvést, že první měnič používá dva MPPT a druhý šest MPPT, částky zohledňující benefity jednotlivých algoritmů byly započítány pouze jednou, a proto není u analogových variant cena za 2 MPPT, resp. 6 MPPT rovna prostému vynásobení hodnoty odpovídající ceně jednoho MPPT. Po této operaci už nám vychází cena za zbylou část měniče. Jak jsem zmiňoval dříve, tato část je pro všechny typy algoritmu stejná. Tento výpočet proběh s použitím dat pro variantu P&O-D, a cena za zbylou část měniče byla doplněna i k dalším variantám. Následně byla zpětně přepočítána tržní cena pro jednotlivé typy použitých algoritmů, viz. tab. 17, cena bez marže odpovídá součtu řídicí části (MPPT) a zbylé ceny za měnič. Dále je vypočtena cena bez DPH, která zahrnuje navíc ještě marži výrobce. Velikost marže je uvažovaná pro všechny varianty stejná, a to 15%. Nakonec je určena cena s DPH, uvažováno 21 %. Tyto ceny jsou pak použity v následující kapitole jako počáteční investice. Pro lepší pochopení daného postupu výpočtu přikládám tabulky 14 – 16. Tržní cena měniče ABB PVI-5000-TL-OUTD byla zjištěna jako 26 730 Kč, pro ABB PVI 330.0 pak 1 285 000 Kč.

Z těchto výpočtů jsme tedy dostali další parametr pro ekonomickou analýzu a to pořizovací cenu jednotlivých měničů. Zde je nutné upozornit na to, že u stanovení ceny za řídicí část obvodu jde o hrubý odhad a pro zpřesnění vstupních údajů by bylo potřeba provést detailnější a přesnější analýzu.

Algoritmus	Cena za řídicí část obvodu	
	Malý výkon	Velký výkon
Bez MPPT	1 056 Kč	10 840 Kč
P&O-A	3 896 Kč	23 308 Kč
P&O-D	3 576 Kč	15 420 Kč
P&O-D'	3 876 Kč	16 320 Kč
INC	4 152 Kč	17 940 Kč
FLC	7 824 Kč	37 380 Kč

Tabulka 14 - Odhady cen za řídicí část obvodu

Použitý měnič	Tržní cena	Cena bez DPH	Marže výrobce 15%	Cena po odečtení marže	Odhad ceny za zbylou část měniče
ABB PVI-5000-TL-OUTD	26 730 Kč	22 090 Kč	2 881 Kč	19 209 Kč	15 633 Kč
ABB PVI-330.0 -TL	1 285 000 Kč	1 061 983 Kč	138 520 Kč	923 463 Kč	923 463 Kč

Tabulka 15 - Postup výpočtu ceny za zbylou část měniče

Malý výkon					
Algoritmus	Řídicí část, MPPT	Zbylá část	Cena bez marže	Cena bez DPH	Tržní cena, s DPH
Bez MPPT	1 056 Kč	15 633 Kč	16 689 Kč	19 192 Kč	23 223 Kč
P&O-A	3 896 Kč	15 633 Kč	19 529 Kč	22 458 Kč	27 175 Kč
P&O-D	3 576 Kč	15 633 Kč	19 209 Kč	22 090 Kč	26 730 Kč
P&O-D'	3 876 Kč	15 633 Kč	19 509 Kč	22 435 Kč	27 147 Kč
INC	4 152 Kč	15 633 Kč	19 785 Kč	22 752 Kč	27 532 Kč
FLC	7 824 Kč	15 633 Kč	23 457 Kč	26 975 Kč	32 641 Kč

Velký výkon					
Algoritmus	Řídicí část, MPPT	Zbylá část	Cena bez marže	Cena bez DPH	Tržní cena, s DPH
Bez MPPT	10 840 Kč	908 043 Kč	918 883 Kč	1 056 716 Kč	1 278 626 Kč
P&O-A	23 308 Kč	908 043 Kč	931 351 Kč	1 071 054 Kč	1 295 976 Kč
P&O-D	15 420 Kč	908 043 Kč	923 463 Kč	1 061 983 Kč	1 285 000 Kč
P&O-D'	16 320 Kč	908 043 Kč	924 363 Kč	1 063 018 Kč	1 286 252 Kč
INC	17 940 Kč	908 043 Kč	925 983 Kč	1 064 881 Kč	1 288 506 Kč
FLC	37 380 Kč	908 043 Kč	945 423 Kč	1 087 237 Kč	1 315 557 Kč

Tabulka 16 - Zpětný přepočítání na cenu s DPH

7. Výpočet NPV

Ve dvou minulých kapitolách jsme si popsali postup, kterým jsme získali vstupní hodnoty pro výpočet ekonomické výhodnosti jednotlivých typů řešení. V této práci bude použito pro porovnání jednotlivých variant rozdílové NPV. Vstupními údaji budou jednak pořizovací ceny měničů, které budou odpovídat zápornému CF v nultém roce a dále pak ceny za ušetřenou, resp. prodanou E, pro variantu rodinného domu, resp. komerční elektrárny. Tyto hodnoty budou brány jako kladné výnosy a budou vypočítány jako cena za kWh násobená množstvím vyrobené energie (40). Dále budou provedeny citlivostní analýzy zohledňující cenu elektřiny a diskont. Doba životnosti projektu je uvažována na 20 let. Je započten vliv inflace, každý rok se tedy počítá se zvýšením tržních cen elektřiny o 2 % oproti předchozímu roku. Výpočet NPV je proveden podle vzorce (39).

$$NPV = \frac{\sum_0^i CF}{(1+r)^i} \quad (39)$$

$$CF = \text{cena elektřiny} \cdot \text{množství vyrobené elektřiny} \quad (40)$$

Pro ekonomické zhodnocení možnosti výběru měniče byly zvoleny tři teoretické scénáře. První je pořízení nové FVE na střechu rodinného domu v Praze, druhý je výměna měniče u velké fotovoltaiky instalované na zemědělské půdě. Dále je také uvažována možnost výstavby nového velkého FV zdroje. V současné době sice v ČR takovéto zdroje stavěny nejsou, nicméně řada investorů již uvažuje o výstavbě nových velkých FVE.

7.1. Malý výkon – rodinný dům

Pro variantu rodinného domu je zvolen instalovaný výkon FV zdroje 5kWp. Jako cena elektřiny je uvažována cena, za kterou by si domácnost musela koupit dané množství energie od dodavatele. Je zde však uvažována pouze variabilní složka ceny za elektřinu, jelikož se předpokládá, že domácnost stále zůstává připojena do elektrizační soustavy. Pro zvolenou lokalitu Praha a blízké okolí, (PRE distribuce) se variabilní složky ceny bez DPH pohybují zhruba v rozmezí 2 - 4 Kč/kWh v závislosti na zvoleném tarifu. V citlivostní analýze budeme uvažovat ceny od 1,5 do 5 Kč/kWh. Takto velký rozsah je volen s ohledem na možný vývoj cen elektřiny v budoucnu. Diskont je pak uvažován v rozmezí 1,5 - 4,5 %, což odpovídá výši diskontu pro fyzickou osobu. V této hodnotě je zahrnuta inflace a minimální bezrizikový výnos. Dále je uvažováno zjednodušení, že všechna vyrobená elektřina bude spotřebována v daném RD, i když je jasné, že toto v reálné situaci nikdy splněno nebude.

Jako referenční jsou pak zvoleny hodnoty $P = 3$ Kč/kWh a $r = 3$ %. Referenční cena je volena na základě získaných faktur, příloha 6 - 8. Jak již bylo řečeno, zvolený diskont zahrnuje jak pokrytí inflace, tak bezrizikovou investici do jiného projektu. Při použití těchto hodnot ceny elektřiny a diskontu vychází jako nejlepší varianta P&O-D'. Při pohledu na citlivostní analýzu vidíme (tab. 18 – 19), že při použití jiných hodnot P a r , dosahuje nejlepších výsledků naopak FLC. Tato varianta je nejvýhodnější při vyšších cenách elektřiny, od 4,5 Kč/kWh, a to z důvodu vyšší výroby a tím pádem větších úspor. Oproti tomu při malých cenách nehraje velikost výroby

tak značnou roli a spíše se uplatní rozdíl v pořizovací ceně měniče, kde P&O-D' dosahuje lepšího výsledku než FLC. Při menších cenách se dokonce FLC jeví jako nejméně výhodná, neuvažujeme-li variantu bez MPPT.

Máme-li hodnotit vliv diskontu, zde platí, že čím vyšší hodnotu diskontu zvolíme, tím více budou znevýhodněny varianty s vyšší výrobou el. energie, tedy hlavně FLC a to z důvodu postupného snižování významu výnosů spojených s vyšší výrobou oproti počátečním investičním nákladům.

Co se týče ostatních variant, řešení s algoritmy P&O-A a INC vychází vždy horší než P&O-D. U P&O-A je to způsobenou stejnou účinností algoritmu, tím pádem i stejnou výrobou a zároveň vyššími pořizovacími náklady. Z tohoto důvodu nemůže tato varianta nikdy dosáhnout lepších výsledků než P&O-D. INC má sice oproti P&O-D lepší účinnost, ale rozdíl činí pouhé dvě setiny procenta a změna ve velikosti výroby je tedy minimální. Investiční cena měniče s algoritmem INC je vůči P&O-D vyšší o zhruba 3 %. Je tedy pochopitelné, že P&O-D dosahuje vždy lepších výsledků. Varianta nepoužívající žádný MPPT je ze všech řešení jednoznačně nejhorší.

Jako nejlepší se tedy v závislosti na ceně elektřiny a diskontu jeví vždy buď FLC nebo P&O-D', v tab. 18 – 19 zřetelně tučně. Pro vyšší ceny elektřiny vychází jako nejvýhodnější řešení s FLC. Dále se výhodnost této varianty zvyšuje s klesajícím diskontem. Oproti tomu při nižších cenách a vyšších hodnotách diskontu se více vyplácí varianta P&O-D'. Tato varianta se jeví jako nejvýhodnější pro největší množství uvažovaných kombinací P a r.

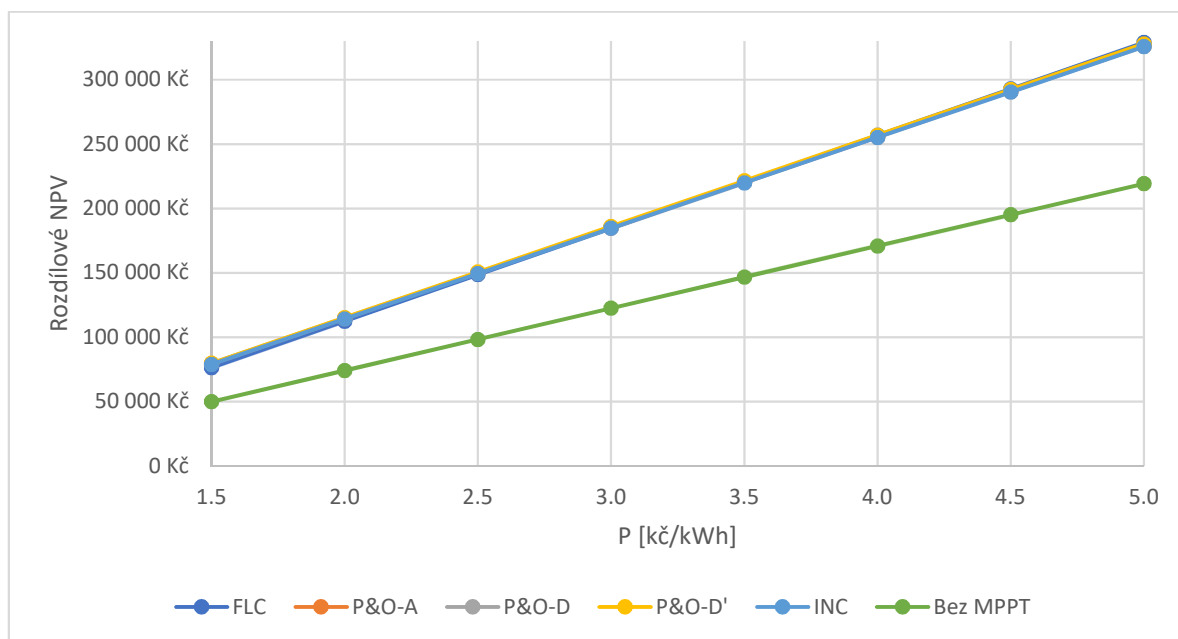
Na základě získaných dat můžeme tvrdit, že pro měnič použitý pro malé FV zdroje o velikosti cca 5 kWp, jako je tomu například u rodinných domů, se pro největší rozsah uvažovaných cen a diskontů nejvíce vyplácí použití měniče s algoritmem P&O-D'. Za určitých předpokladů se jako nejlepší jeví varianta s FLC. Je však nutné vzít v potaz, zdali se výrobcům vyplatí investovat do vývoje nové technologie pokud jsou rozdíly v ekonomické výhodnosti tohoto řešení u variant malého výkonu, oproti v současnosti často používané variantě P&O-D, případně P&O-D', malé. Z výše popsaného plyne, že u měničů s malým instalovaným výkonem a uvažovanými hodnotami ceny elektřiny, nemá příliš smysl zabývat se vývojem měničů s pokročilými řešeními sledování bodu maxima.

CF						
Rok	FLC	P&O-A	P&O-D	P&O-D'	INC	Bez MPPT
0	-32 641 Kč	-27 175 Kč	-26 730 Kč	-27 147 Kč	-27 532 Kč	-23 223 Kč
1	13 158 Kč	12 854 Kč	12 854 Kč	12 921 Kč	12 856 Kč	8 824 Kč
2	13 354 Kč	13 045 Kč	13 045 Kč	13 113 Kč	13 048 Kč	8 956 Kč
3	13 553 Kč	13 240 Kč	13 240 Kč	13 309 Kč	13 242 Kč	9 089 Kč
4	13 755 Kč	13 437 Kč	13 437 Kč	13 507 Kč	13 440 Kč	9 224 Kč
5	13 960 Kč	13 637 Kč	13 637 Kč	13 708 Kč	13 640 Kč	9 362 Kč
6	14 168 Kč	13 840 Kč	13 840 Kč	13 913 Kč	13 843 Kč	9 501 Kč
7	14 379 Kč	14 047 Kč	14 047 Kč	14 120 Kč	14 049 Kč	9 643 Kč
8	14 594 Kč	14 256 Kč	14 256 Kč	14 330 Kč	14 259 Kč	9 787 Kč
9	14 811 Kč	14 468 Kč	14 468 Kč	14 544 Kč	14 471 Kč	9 933 Kč
10	15 032 Kč	14 684 Kč	14 684 Kč	14 760 Kč	14 687 Kč	10 081 Kč
11	15 256 Kč	14 903 Kč	14 903 Kč	14 980 Kč	14 906 Kč	10 231 Kč
12	15 483 Kč	15 125 Kč	15 125 Kč	15 204 Kč	15 128 Kč	10 383 Kč
13	15 714 Kč	15 350 Kč	15 350 Kč	15 430 Kč	15 353 Kč	10 538 Kč
14	15 948 Kč	15 579 Kč	15 579 Kč	15 660 Kč	15 582 Kč	10 695 Kč
15	16 185 Kč	15 811 Kč	15 811 Kč	15 893 Kč	15 814 Kč	10 854 Kč
16	16 427 Kč	16 046 Kč	16 046 Kč	16 130 Kč	16 050 Kč	11 016 Kč
17	16 671 Kč	16 286 Kč	16 286 Kč	16 371 Kč	16 289 Kč	11 180 Kč
18	16 920 Kč	16 528 Kč	16 528 Kč	16 614 Kč	16 532 Kč	11 347 Kč
19	17 172 Kč	16 774 Kč	16 774 Kč	16 862 Kč	16 778 Kč	11 516 Kč
20	17 428 Kč	17 024 Kč	17 024 Kč	17 113 Kč	17 028 Kč	11 687 Kč
NPV	184 679 Kč	184 978 Kč	185 410 Kč	186 108 Kč	184 676 Kč	122 554 Kč

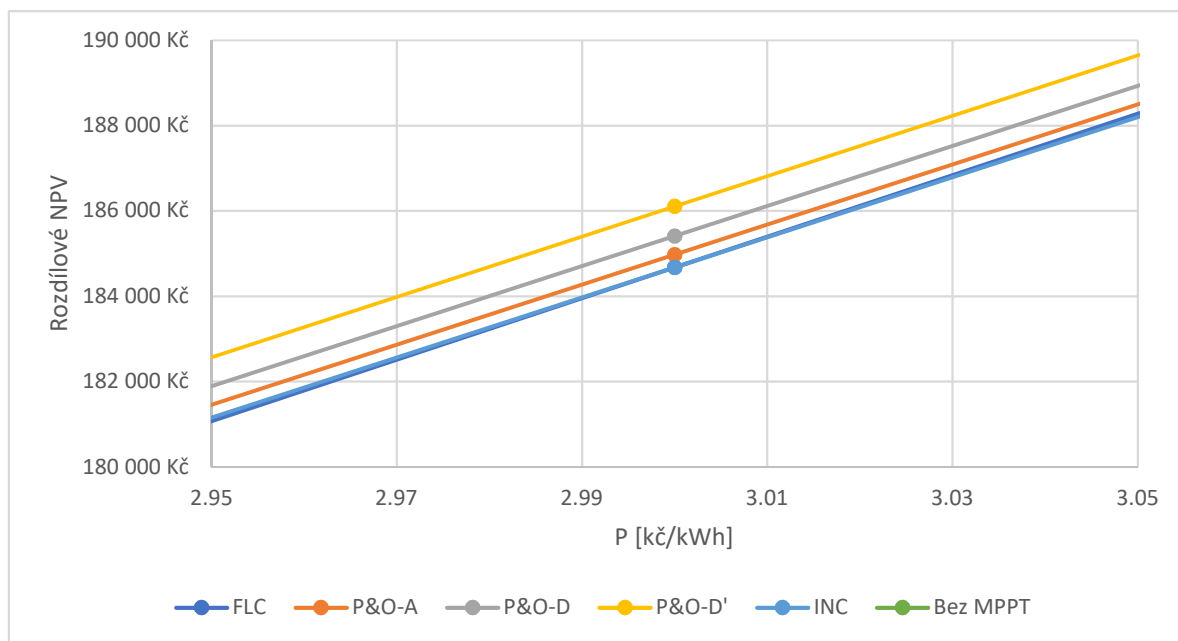
Tabulka 17 - Výpočet NPV, varianta malého výkonu, $P = 3 \text{ Kč/kWh}$, $r = 3\%$

P [Kč/kWh]	FLC	P&O-A	P&O-D	P&O-D'	INC	Bez MPPT
5,0	328 925 Kč	325 886 Kč	326 318 Kč	327 751 Kč	325 613 Kč	219 288 Kč
4,5	292 863 Kč	290 659 Kč	291 091 Kč	292 340 Kč	290 379 Kč	195 104 Kč
4,0	256 802 Kč	255 432 Kč	255 864 Kč	256 930 Kč	255 145 Kč	170 921 Kč
3,5	220 740 Kč	220 205 Kč	220 637 Kč	221 519 Kč	219 910 Kč	146 737 Kč
3,0	184 679 Kč	184 978 Kč	185 410 Kč	186 108 Kč	184 676 Kč	122 554 Kč
2,5	148 617 Kč	149 751 Kč	150 183 Kč	150 697 Kč	149 442 Kč	98 370 Kč
2,0	112 556 Kč	114 524 Kč	114 956 Kč	115 286 Kč	114 208 Kč	74 187 Kč
1,5	76 494 Kč	79 297 Kč	79 729 Kč	79 876 Kč	78 973 Kč	50 003 Kč

Tabulka 18 - Citlivostní analýza ceny elektřiny



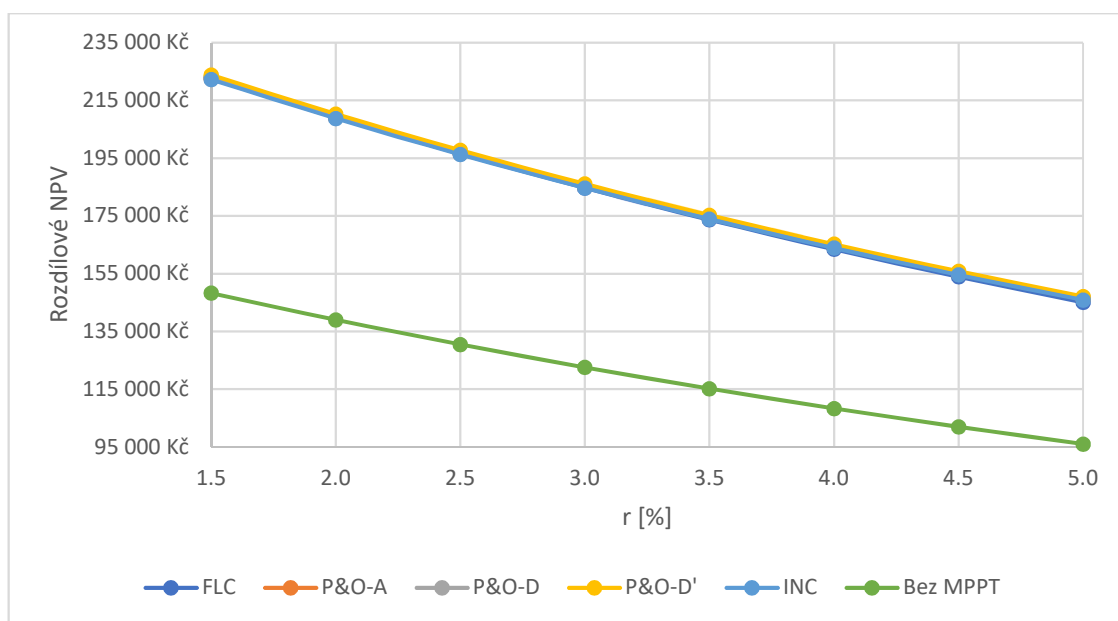
Graf 1 - Citlivostní analýza ceny elektřiny, malý výkon



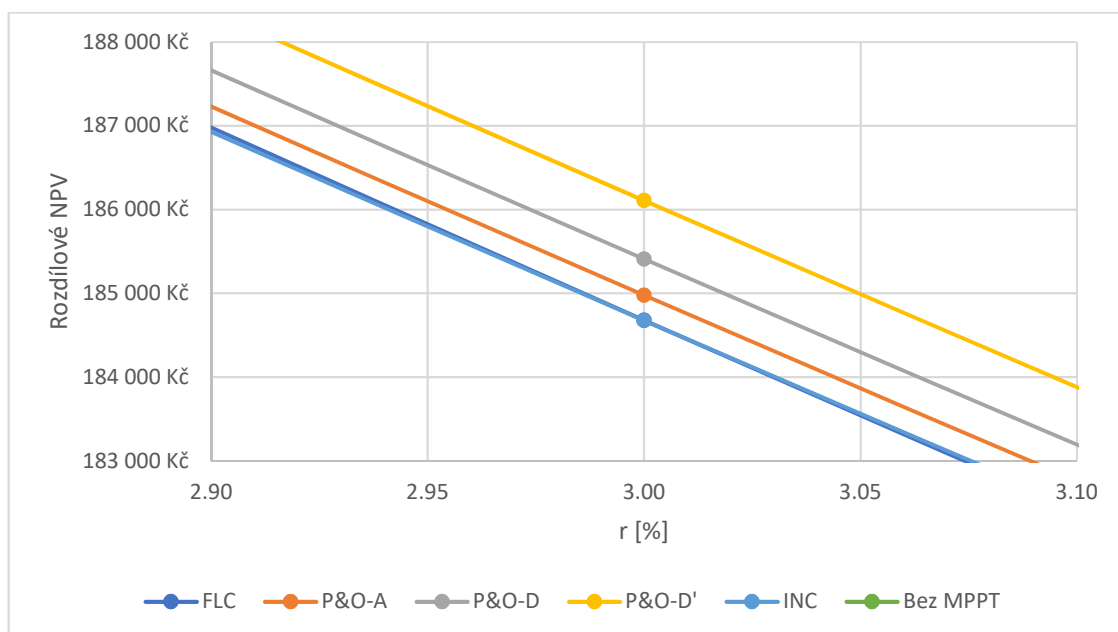
Graf 2 - Přiblížení oblasti grafu 1

r [%]	FLC	P&O-A	P&O-D	P&O-D'	INC	Bez MPPT
5,0	145 065 Kč	146 194 Kč	146 618 Kč	147 119 Kč	145 891 Kč	96 013 Kč
4,5	153 931 Kč	154 876 Kč	155 302 Kč	155 847 Kč	154 573 Kč	101 952 Kč
4,0	163 449 Kč	164 196 Kč	164 624 Kč	165 216 Kč	163 893 Kč	108 330 Kč
3,5	173 678 Kč	174 209 Kč	174 639 Kč	175 282 Kč	173 907 Kč	115 183 Kč
3,0	184 679 Kč	184 978 Kč	185 410 Kč	186 108 Kč	184 676 Kč	122 554 Kč
2,5	196 522 Kč	196 569 Kč	197 004 Kč	197 761 Kč	196 268 Kč	130 490 Kč
2,0	209 283 Kč	209 058 Kč	209 494 Kč	210 315 Kč	208 758 Kč	139 041 Kč
1,5	223 047 Kč	222 526 Kč	222 964 Kč	223 854 Kč	222 227 Kč	148 265 Kč

Tabulka 19 - Citlivostní analýza diskontu



Graf 3 - Citlivostní analýza velikosti diskontu, malý výkon



Graf 4 - Přiblížení oblastí grafu 3

7.2. Velké výkony

Jako druhou jsem zvolil variantu s větším instalovaným výkonem, 330 kWp a výkonnějším měničem, přesněji se jedná o ABB PVI-330.0-TL. Postup výpočtu NPV byl podobný jako u předchozí varianty. Jediným rozdílem zde bylo uvažování zdanění výnosů výrobce elektrické energie. Sazba byla zvolena 19 %. O tuto hodnotu byly tedy sníženy výnosy z prodeje elektřiny v každém roce. Dále budeme uvažovat dva scénáře. Jako první je zvolena výstavba nové elektrárny, zadruhé je pak uvažována výměna měniče u již fungující elektrárny zprovozněné zhruba před deseti lety. V současné době sice výstavba takovýchto zdrojů v ČR neprobíhá, nicméně řada investorů zvažuje výstavbu nových komerčních FV elektráren [31]. Případně je možné uvažovat tento postup výpočtu pro jinou lokalit než ČR.

7.2.1. Výstavba nové elektrárny

Výkupní cena elektřiny byla uvažována jako cena silové elektřiny na burze PXE, jako referenční byla po konzultaci s ekonomickým vedoucím zvolena cena ročních kontraktů, tedy cca 50 €/MWh. Kurz koruny vůči euru byl zvolen 25,7 Kč/€. Po přepočtu pak tedy dostáváme cenu 1100 Kč/MWh, resp. 1,1 Kč za kWh. Diskont je uvažován 7 %. Tato hodnota je volena tak, aby pokrývala 2% inflaci. Dále také zahrnuje možnost investice do jiného, bezrizikového zdroje. Uvažovány jsou např. státní dluhopisy s výnosností cca 2 %. A nakonec uvažuje požadovanou míru výnosnosti projektu, která je volena jako 3 %. Dále byla provedena citlivostní analýza zohledňující různé ceny elektřiny. Stejně tak byla uvažována rozdílná hodnota diskontu. Rozsah cen byl zvolen 1,4 – 0,8 Kč/kWh a pro diskont pak 4 – 10 %. Cena za měnič je uvažovaná bez DPH, jelikož předpokládáme, že investorem je firma, která si nárokuje odpočet DPH.

Jako referenční tedy byly zvoleny hodnoty $P = 1,1 \text{ Kč/kWh}$ a $r = 7 \%$, výpočet NPV pak viz. tab. 21. Nejlepšího výsledku dosahuje varianta s algoritmem FLC. Důvodem bude výraznější změna v absolutní výrobě energie oproti první variantě, vycházející z vyššího instalovaného výkonu FV zdroje, a z toho plynoucí zvýšení tržeb za prodej elektřiny. Dále také menší poměrná částka za řídicí část obvodu, ku zbylé části a tím způsobený i menší procentuální rozdíl v koncových cenách měničů, oproti předchozí variantě. Jak bylo uvedeno výše, v řídicí části obvodu jsou vůči variantě pro malý výkon pozměněny pouze diody a tranzistor.

Po pohledu na citlivostní analýzy vidíme, že varianta s FLC dosahuje nejlepších výsledků v celém rozsahu uvažovaných diskontů i cen. S vyšší cenou elektřiny se její převaha vůči ostatním variantám zvyšuje. Naopak s rostoucím diskontem se FLC jeví vůči ostatním hodnotám méně výhodněji. Jako druhá nejlepší se jeví varianta používající algoritmus P&O-D', následovaná popořadě P&O-D, INC a P&O-A, jako nejhorší se znovu jeví varianta bez MPPT a to pro všechny hodnoty diskontu i cen elektřiny.

Vidíme tedy, že varianty jsou v tomto případě seřazeny převážně podle účinnosti sledování bodu maxima. Jedinou výjimku tvoří P&O-D, které má sice horší účinnost než INC, nicméně rozdíl je pouze 0,02 %, oproti tomu rozdíl v pořizovací ceně měniče je 2,7 %. Tento parametr tedy převládá nad hodnotou účinnosti, potažmo rozdílu ve výrobě, a tím způsobenými vyššími výnosy. Můžeme tedy vyvodit závěr, že pro větší instalované výkony záleží především na účinnosti použitého algoritmu, a méně pak na pořizovací ceně měniče. Vyplatí se zde tedy zvýšená počáteční investice do dražšího, ale zároveň účinnějšího řešení.

Závěrem tedy můžeme konstatovat, že pro zdroje větších instalovaných výkonů se vyplatí zainvestovat do varianty, která má sice vyšší počáteční náklady, na druhou stranu přináší značné zvýšení účinnosti systému. Druhý nejlepší algoritmus P&O-D' nedosahuje nikdy lepších

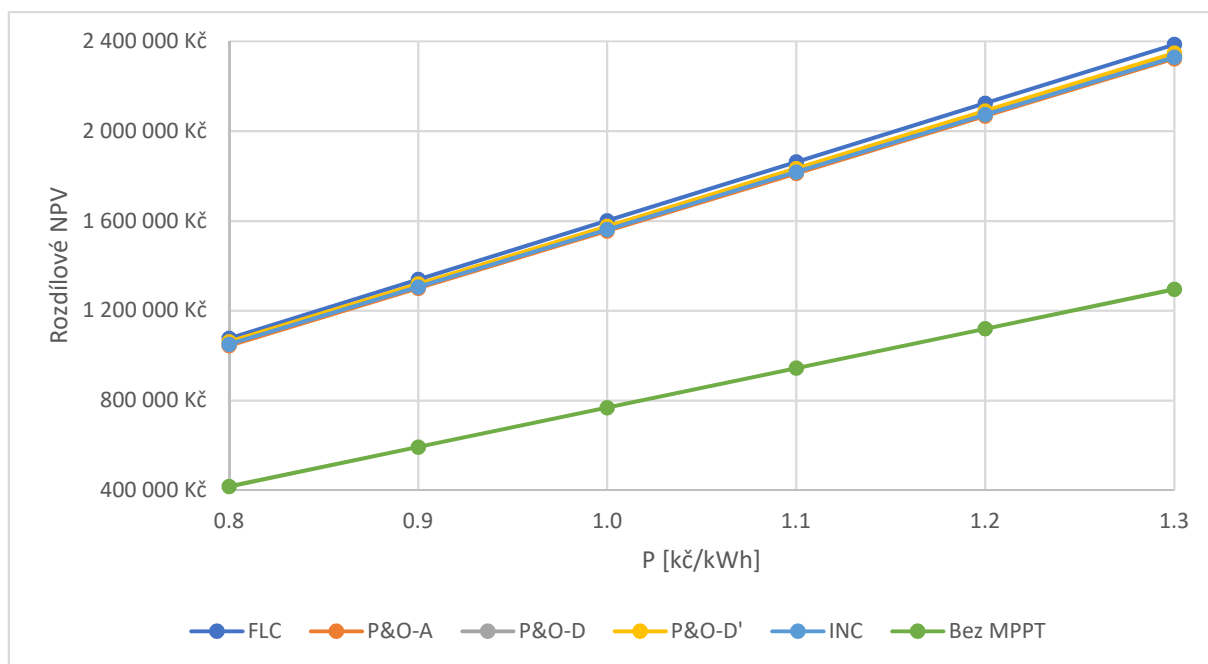
výsledků než FLC, jako je tomu u varianty s malým instalovaným výkonem. Z výše uvedeného tedy vyplývá, že pro aplikace velkých výkonů se vyplatí zabývat vývojem a aplikací složitějších, ale zároveň přesnějších algoritmů pro sledování bodu maximálního výkonu FV zdroje.

Rok	CF					
	FLC	P&O-A	P&O-D	P&O-D'	INC	Bez MPPT
0	-1 087 237 Kč	-1 071 261 Kč	-1 061 983 Kč	-1 063 018 Kč	-1 064 881 Kč	-1 056 716 Kč
1	260 091 Kč	254 089 Kč	254 089 Kč	255 412 Kč	254 142 Kč	174 562 Kč
2	263 967 Kč	257 875 Kč	257 875 Kč	259 217 Kč	257 929 Kč	177 163 Kč
3	267 900 Kč	261 718 Kč	261 718 Kč	263 079 Kč	261 772 Kč	179 802 Kč
4	271 892 Kč	265 617 Kč	265 617 Kč	267 000 Kč	265 673 Kč	182 482 Kč
5	275 943 Kč	269 575 Kč	269 575 Kč	270 978 Kč	269 630 Kč	185 201 Kč
6	280 055 Kč	273 591 Kč	273 591 Kč	275 015 Kč	273 649 Kč	187 960 Kč
7	284 227 Kč	277 668 Kč	277 668 Kč	279 113 Kč	277 726 Kč	190 761 Kč
8	288 463 Kč	281 805 Kč	281 805 Kč	283 272 Kč	281 864 Kč	193 603 Kč
9	292 761 Kč	286 004 Kč	286 004 Kč	287 492 Kč	286 063 Kč	196 487 Kč
10	297 123 Kč	290 266 Kč	290 266 Kč	291 776 Kč	290 326 Kč	199 416 Kč
11	301 549 Kč	294 591 Kč	294 591 Kč	296 124 Kč	294 652 Kč	202 387 Kč
12	306 042 Kč	298 980 Kč	298 980 Kč	300 536 Kč	299 042 Kč	205 403 Kč
13	310 603 Kč	303 434 Kč	303 434 Kč	305 014 Kč	303 497 Kč	208 463 Kč
14	315 230 Kč	307 956 Kč	307 956 Kč	309 558 Kč	308 019 Kč	211 568 Kč
15	319 927 Kč	312 544 Kč	312 544 Kč	314 171 Kč	312 610 Kč	214 721 Kč
16	324 695 Kč	317 201 Kč	317 201 Kč	318 853 Kč	317 268 Kč	217 921 Kč
17	329 532 Kč	321 928 Kč	321 928 Kč	323 604 Kč	321 995 Kč	221 168 Kč
18	334 442 Kč	326 725 Kč	326 725 Kč	328 425 Kč	326 792 Kč	224 463 Kč
19	339 426 Kč	331 593 Kč	331 593 Kč	333 319 Kč	331 661 Kč	227 807 Kč
20	344 483 Kč	336 534 Kč	336 534 Kč	338 284 Kč	336 604 Kč	231 201 Kč
NPV	1 863 008 Kč	1 811 495 Kč	1 820 166 Kč	1 833 838 Kč	1 818 044 Kč	944 752 Kč

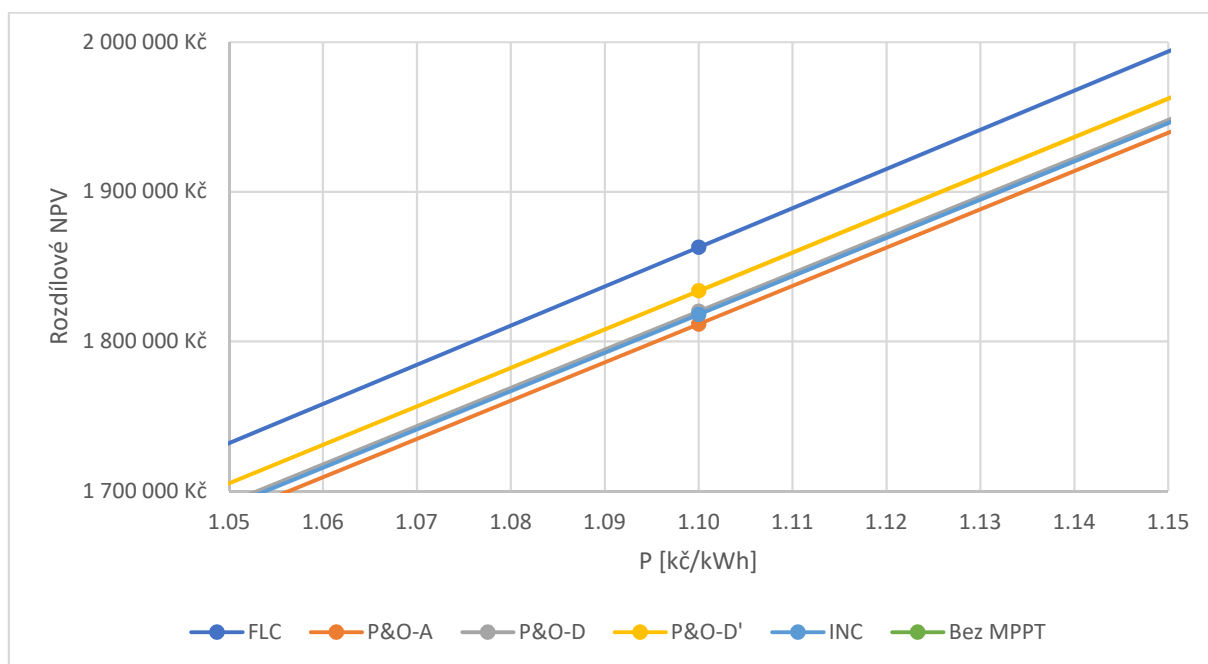
Tabulka 20 - Výpočet NPV, varianta komerční FVE, $P = 1,1 \text{ Kč/kWh}$, $r = 7\%$

P [Kč/kWh]	FLC	P&O-A	P&O-D	P&O-D'	INC	Bez MPPT
1,3	2 386 484 Kč	2 323 083 Kč	2 331 561 Kč	2 347 894 Kč	2 329 545 Kč	1 296 085 Kč
1,2	2 124 746 Kč	2 067 386 Kč	2 075 864 Kč	2 090 866 Kč	2 073 795 Kč	1 120 418 Kč
1,1	1 863 008 Kč	1 811 688 Kč	1 820 166 Kč	1 833 838 Kč	1 818 044 Kč	944 752 Kč
1,0	1 601 270 Kč	1 555 991 Kč	1 564 468 Kč	1 576 809 Kč	1 562 293 Kč	769 085 Kč
0,9	1 339 532 Kč	1 300 293 Kč	1 308 771 Kč	1 319 781 Kč	1 306 542 Kč	593 418 Kč
0,8	1 077 794 Kč	1 044 596 Kč	1 053 073 Kč	1 062 752 Kč	1 050 791 Kč	417 751 Kč

Tabulka 21 - Citlivostní analýza ceny elektřiny, velký výkon



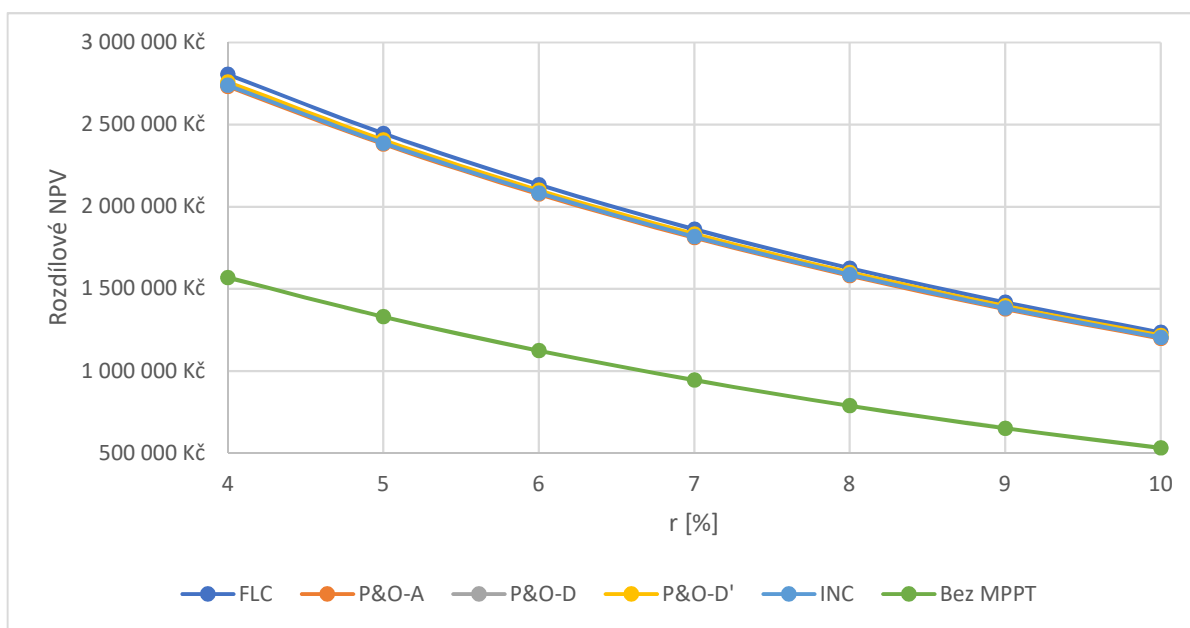
Graf 5 - Citlivostní analýza ceny elektřiny, velký výkon



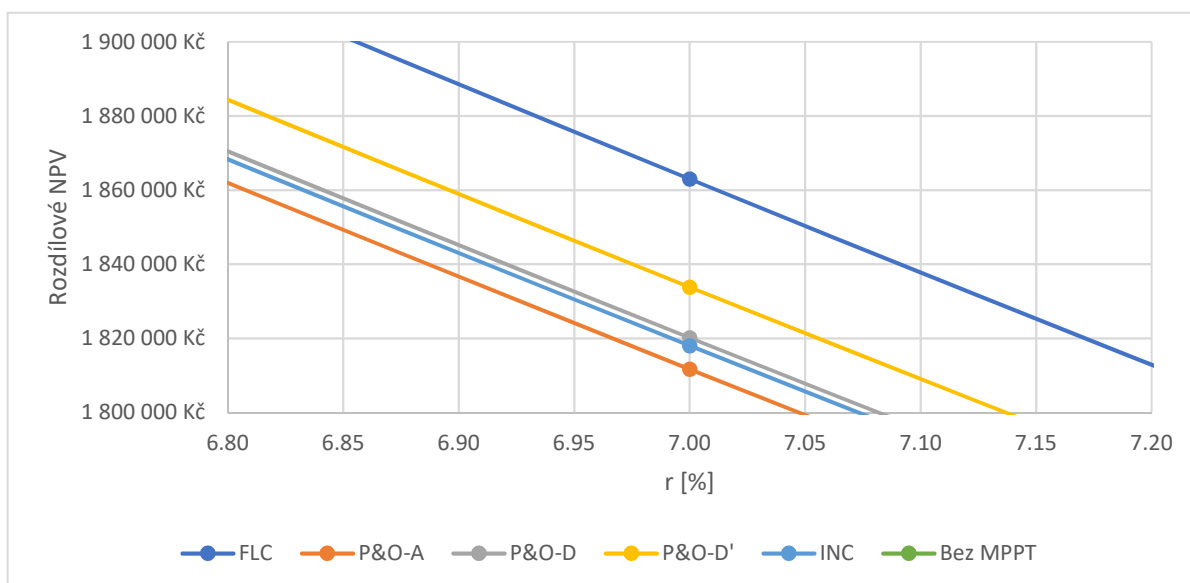
Graf 6 - Přiblížení oblastí grafu 5

r [%]	FLC	P&O-A	P&O-D	P&O-D'	INC	Bez MPPT
10	1 234 905 Kč	1 198 120 Kč	1 206 554 Kč	1 216 918 Kč	1 204 372 Kč	531 532 Kč
9	1 417 776 Kč	1 376 694 Kč	1 385 206 Kč	1 396 537 Kč	1 383 039 Kč	651 539 Kč
8	1 625 746 Kč	1 579 787 Kč	1 588 378 Kč	1 600 804 Kč	1 586 230 Kč	788 341 Kč
7	1 863 008 Kč	1 811 495 Kč	1 820 166 Kč	1 833 838 Kč	1 818 044 Kč	944 752 Kč
6	2 134 570 Kč	2 076 709 Kč	2 085 462 Kč	2 100 554 Kč	2 083 371 Kč	1 124 128 Kč
5	2 446 423 Kč	2 381 284 Kč	2 390 120 Kč	2 406 838 Kč	2 388 069 Kč	1 330 493 Kč
4	2 805 766 Kč	2 732 250 Kč	2 741 172 Kč	2 759 758 Kč	2 739 169 Kč	1 568 673 Kč

Tabulka 22 - Citlivostní analýza diskontu, velký výkon



Graf 7 - Citlivostní analýza velikosti diskontu, velký výkon



Graf 8 - Přiblížení oblastí grafu 7

7.2.2. Výměna měniče, u již fungující elektrárny

V této variantě budeme uvažovat výměnu stávajícího měniče u již postavené a provozované komerční FVE. Je uvažován zdroj, který byl uveden do provozu mezi 1.1.2008 a 31.12.2008. Provozovatel uvažovaného zdroje má, po dobu 20 let, státem garantovanou výkupní cenu elektřiny. Tato cena není konstantní a je každoročně stanovována ERÚ. Z daného vyplývá, že pro budoucí roky není tato cena známá a musel proto být proveden její odhad. Byla vypočtena složená roční míra růstu, viz vzorec (41), a dané tempo růstu bylo uvažováno pro následující roky. Hodnota byla určena na 2,01 %. Výpočet proběhl na základě známých výkupních cen pro roky 2009 a 2018 [32], [33]. Každý rok je poté cena elektřiny násobena touto hodnotou [34]. Jako počáteční je použita cena z roku 2018, tedy 16 761 Kč.

$$\text{Tempo růstu} = \left(\frac{\text{výkupní cena elektřiny}_{2018}}{\text{výkupní cena elektřiny}_{2009}} \right)^{\frac{1}{\text{počet let}}} - 1 \quad (41)$$

$$\text{Tempo růstu} = \left(\frac{16\,761}{14\,010} \right)^{\frac{1}{9}} - 1 = 2,01\% \quad (42)$$

V této variantě budeme uvažovat výměnu stávajícího měniče u zdroje, který už je nějaký čas v provozu. Zvolil jsem elektrárnu, která byla uvedena do provozu mezi 1.1.2008 a 31.12.2008. Výměnu měniče uvažuji na počátek roku 2019, tedy v půlce životnosti projektu. Zvýšené výnosy tedy budou získávané po dobu 10 let. Jako počáteční je předpokládán měnič používající technologii P&O-D a rozdíly ve výrobě jsou vztaženy k tomuto měniči. Varianty P&O-A ani Bez MPPT uvažovány nejsou, jelikož by nepřinesly zvýšení výroby. Ceny za měnič jsou brány bez DPH. Změnu ve výrobě je možné pozorovat v tab. 23. Výpočet CF a NPV pak v tab. 24.

Jak vidíme, všechny ostatní varianty dosahují záporného NPV. Za předpokladu, že stávající měnič by se podařilo v roce výměny prodat za 250 000 Kč, viz. tab. 25, vychází NPV stále záporné pro všechny varianty. Kdybychom uvažovali částku 500 000 Kč, tab. 26, dostáváme se u varianty s FLC do kladného NPV, nicméně velikost NPV je pouhých 57 310 Kč, což by s největší pravděpodobností nevedlo provozovatele k rozhodnutí o pořízení nového měniče, jelikož by náklady spojené s touto operací značně přesáhly uvažované zvýšení výnosů. Diskont je uvažován znovu 7 %. Z výše popsaného je zřejmé, že výměna měniče u uvažovaného projektu se nevyplatí. Závěrem je nutné poznamenat, že není jisté, zdali by se stávající měnič vůbec podařilo prodat, a proto by se potenciální investor nejspíše nerozhodl pro pořízení nového měniče za žádných okolností.

Rok	Změna ve výrobě vůči P&O			
	FLC	P&O	P&O'	INC
1	6 281	-	1 384	55
2	6 250	-	1 377	55
3	6 219	-	1 371	55
4	6 188	-	1 363	54
5	6 157	-	1 356	55
6	6 127	-	1 351	55
7	6 095	-	1 343	54
8	6 064	-	1 337	53
9	6 035	-	1 330	53
10	6 004	-	1 322	53

Tabulka 23 - Změna ve výrobě oproti stávajícímu měniči, P&O

CF				
Rok	FLC	P&O-D	P&O-D'	INC
0	-1 087 237 Kč	-	-1 063 018 Kč	-1 064 881 Kč
1	86 987 Kč	-	19 165 Kč	762 Kč
2	88 301 Kč	-	19 457 Kč	777 Kč
3	89 632 Kč	-	19 753 Kč	793 Kč
4	90 964 Kč	-	20 036 Kč	792 Kč
5	92 331 Kč	-	20 340 Kč	825 Kč
6	93 732 Kč	-	20 665 Kč	841 Kč
7	95 119 Kč	-	20 960 Kč	841 Kč
8	96 540 Kč	-	21 276 Kč	841 Kč
9	97 998 Kč	-	21 597 Kč	857 Kč
10	99 458 Kč	-	21 903 Kč	875 Kč
NPV	-409 980 Kč	0 Kč	-859 919 Kč	-989 875 Kč

Tabulka 24 - Výpočet NPV při uvažované výměně měniče, bez prodeje stávajícího

CF				
Rok	FLC	P&O-D	P&O-D'	INC
0	-837 237 Kč	-	-813 018 Kč	-814 881 Kč
1	86 987 Kč	-	19 165 Kč	762 Kč
2	88 301 Kč	-	19 457 Kč	777 Kč
3	89 632 Kč	-	19 753 Kč	793 Kč
4	90 964 Kč	-	20 036 Kč	792 Kč
5	92 331 Kč	-	20 340 Kč	825 Kč
6	93 732 Kč	-	20 665 Kč	841 Kč
7	95 119 Kč	-	20 960 Kč	841 Kč
8	96 540 Kč	-	21 276 Kč	841 Kč
9	97 998 Kč	-	21 597 Kč	857 Kč
10	99 458 Kč	-	21 903 Kč	875 Kč
NPV	-176 335 Kč	0 Kč	-626 274 Kč	-756 230 Kč

Tabulka 25 - Výpočet NPV při uvažované výměně měniče, prodeje stávajícího za 250 000 Kč

CF				
Rok	FLC	P&O-D	P&O-D'	INC
0	-587 237 Kč	-	-563 018 Kč	-564 881 Kč
1	86 987 Kč	-	19 165 Kč	762 Kč
2	88 301 Kč	-	19 457 Kč	777 Kč
3	89 632 Kč	-	19 753 Kč	793 Kč
4	90 964 Kč	-	20 036 Kč	792 Kč
5	92 331 Kč	-	20 340 Kč	825 Kč
6	93 732 Kč	-	20 665 Kč	841 Kč
7	95 119 Kč	-	20 960 Kč	841 Kč
8	96 540 Kč	-	21 276 Kč	841 Kč
9	97 998 Kč	-	21 597 Kč	857 Kč
10	99 458 Kč	-	21 903 Kč	875 Kč
NPV	57 310 Kč	0 Kč	-392 629 Kč	-522 585 Kč

Tabulka 26 - Výpočet NPV při uvažované výměně měniče, prodeje stávajícího za 500 000 Kč

7.3. Zhodnocení ekonomické části

Jak bylo popsáno výše, u varianty s malým instalovaným výkonem, typicky rodinný dům, se při téměř všech uvažovaných cenách elektřiny a diskontu nevyplácí investovat do měniče s vyšší účinností sledování bodu maxima. Důvodem je malý rozdíl v celkovém množství vyrobené energie, způsobený malým instalovaným výkonem zdroje. Hlavní roli u této varianty tedy hraje pořizovací cena měniče, kde varianta s lepší účinností, je značně dražší než ostatní uvažovaná řešení. Varianta s neúčinnějším algoritmem FLC se jeví jako nejvýhodnější až pro ceny vyšší než 4,5 Kč/kWh.

Oproti tomu u uvažovaného zdroje s velkým instalovaným výkonem, v našem případě 330 kWp, se nejvíce vyplácí varianta s neúčinnějším měničem, používajícím algoritmus FLC, a to pro všechny uvažované výkupní ceny elektřiny, tak i hodnoty diskontu. Zde jsou již rozdíly ve výrobě významné a pořadí výhodnosti jednotlivých řešení závisí výhradně na účinnosti sledování bodu maxima, a méně pak na investičních nákladech spojených s pořízením měniče.

Jako poslední byla uvažována výměna stávajícího měniče u zdroje velkého výkonu instalovaného na zemědělské půdě a uvedeného do provozu v roce 2008. Provozovatel má státem garantovanou výkupní cenu po dobu 20 let. Výměna měniče je uvažovaná v půlce životnosti projektu, tedy zhruba na počátku roku 2019. Ze získaných dat je zřejmé, že provozovatel by se pro výměnu nerozhodl za žádných okolností. A to ani při uvažovaném prodeji stávajícího měniče.

Závěr

Tato práce je zaměřena na přesnost sledování bodu maximálního výkonu u fotovoltaických zdrojů, v závislosti na použitém měniči, respektive algoritmu, který používá. Pozornost je věnována převážně analýze pohybu tohoto bodu při rychlých změnách intenzity ozáření panelů, což je způsobeno zastíněním FVE mraky. Účinnost daných algoritmů při konstantních podmínkách je také prozkoumána a popsána. V závěru je pak provedeno ekonomické zhodnocení výběru měniče s daným algoritmem. Jsou uvažovány celkem tři scénáře. Zaprvé FV zdroj malého výkonu, uvažovaný na střeše RD. Dále pak výstavba velké komerční FVE. A nakonec výměna měniče u již postavené a fungující elektrárny.

Zpočátku jsou analyzovány změny v intenzitě ozáření panelu způsobené přechodem oblačnosti, a s tím spojené výkyvy ve výstupním výkonu. Jsou prezentovány časové průběhy G . Dále je provedeno rozdělení dnů do čtyřech skupin podle množství a četnosti změn oblačnosti. Následuje představení VA a PV křivek fotovoltaického článku s vyznačením důležitých bodů a je popsán vliv teploty a intenzity ozáření na tvar křivek a pohyb bodu maximálního výkonu. Je vysvětlena důležitost sledování bodu maxima. Dále jsou popsány dnes nejpoužívanější algoritmy pro sledování tohoto bodu. Jsou vysvětleny principy jejich fungování a uvedeny výhody a nevýhody, komplexnost daného řešení, a s tím spojená jeho cena. Poté jsou prostudovány účinnosti sledování bodu maxima jednotlivých algoritmů při dynamických a statických podmínkách intenzity ozáření. Jsou analyzována osvitová data z UCEEB s krokem 1 s, a na základě těchto jsou určeny poměry dob s proměnnými a konstantními hodnotami G , pro jednotlivé typy dnů a ročních období, z čehož je následně vypočtena účinnost jednotlivých algoritmů při daných variacích ročního období a typu dne. V závěru je pak vypočtena celková roční účinnost všech řešení, závislá na počtu jednotlivých typů dne v daném ročním období, zde byla znovu použita data z UCEEB. Následuje popis jednotlivých částí měničů používaného ve fotovoltaice. Jsou zhodnoceny rozdíly mezi danými variantami. Pozornost je věnována především jednofázovým beztransformátorovým měničům, jsou proto představeny dnes nejpoužívanější typy zapojení a jejich obvodová schémata. Dále jsou uvedeny účinnosti těchto variant. V závěru technické části práce je uveden rozbor celkové účinnosti měniče, která se skládá z účinnosti MPPT a účinnosti střídače, která je závislá na okamžité hodnotě výkonu zdroje. V závěru technické části práce jsou ještě zhodnoceny parametry ovlivňující cenu řídicí části obvodu měniče.

V ekonomické části práce je poté zhodnocen vliv použitého řešení na ekonomickou výhodnost projektu. Je uvažováno celkem 6 měničů. Rozdílná účinnost jednotlivých algoritmů způsobí změnu ve výrobě daného systému, a z toho pramenící zvýšení úspor u varianty rodinného domu, resp. výnosů u komerční elektrárny, ty jsou pak vypočítány jako množství vyrobené energie násobené cenou elektřiny. Dále jsou provedeny odhady cen za řídicí části obvodů jednotlivých měničů, používající různé algoritmy. Zpětně je pak určena tržní cena daných měničů. Tyto dva údaje jsou následně použity pro výpočet rozdílového NPV. Jsou uvažovány celkem 3 varianty a to: malý instalovaný výkon 5 kWp odpovídající zdroji použitému na střeše rodinného domu, poté varianta komerční elektrárny s instalovaným výkonem 330 kWp, a dále pak výměna stávajícího měniče za měnič s vyšší účinností, u již zprovozněné elektrárny. Nakonec je provedena citlivostní analýza zabývající se vlivem různých hodnot diskontu a ceny elektřiny.

Pro první variantu, RD, uvažujeme zjednodušení, že daná domácnost spotřebuje veškerou vyrobenou energii, a o toto množství měně nakoupí od poskytovatele. Cena P je zde uvažována

jako variabilní složka ceny za elektřinu bez DPH. Jako referenční je pro lokalitu Prahy a okolí zvolena cena $P = 3 \text{ Kč/kWh}$. V následné citlivostní analýze je volen rozsah cen od 1,5 - 5 Kč/kWh. Pro referenční variantu je nadále, vzhledem k typu investora, volen diskont 3 %, zohledňující inflaci ve výši 2 % a možnost jiného zhodnocení prostředků 1 %. V citlivostní analýze jsou poté uvažovány hodnoty od 1,5 – 5 %. Pro referenční hodnoty vychází nejméně výhodnější řešení používající algoritmus P&O-D'. Tato varianta se ukazuje jako nejméně výhodnější pro téměř všechny uvažované ceny elektřiny. Pouze překračuje-li cena hodnotu 4,5 Kč/kWh, jeví se jako nejlepší použití algoritmu FLC. Je tedy možné vyvodit závěr, že s vyššími cenami za elektřinu se více uplatní rozdíl ve velikosti vyrobené energie, způsobený vyšší účinností, oproti rozdílu v pořizovací ceně za měnič. Pro zdroje malých výkonů bude tedy při výběru měniče nejdůležitějším parametrem pořizovací cena a nikoli účinnost. Při pohledu na citlivostní analýzu diskontu vidíme, že pro všechny uvažované hodnoty dosahuje nejlepší výsledků algoritmus P&O-D', s tím že, čím menší diskont zvolíme, tím více se vyplácí varianta s vyšší výrobou a většími investičními náklady, tedy FLC.

Dále je uvažována varianta s větším instalovaným výkonem přesněji 330 kWp. I zde je uvažována výstavba nové elektrárny. V současné době sice výstavba takovýchto zdrojů v ČR neprobíhá, nicméně řada investorů zvažuje výstavbu nových komerčních FV elektráren. Případně je možné uvažovat jinou lokalitu výstavby než ČR. Jako cena elektřiny je zvolena cena za silovou elektřinu na pražské burze PXE, jsou uvažovány roční kontrakty, které odpovídají ceně zhruba 50 €/MWh, což odpovídá při zvoleném kurzu 25,7 Kč/€, ceně 1,1 Kč/kWh. Diskont je zvolen 7 %, jelikož uvažovaný investor vyžaduje pokrytí 2% inflace, dále pak možnost investice do jiného, bezrizikového zdroje např. státních dluhopisů s ročním výnosem 2 % a na závěr 3% přírůžku za riziko, odpovídající žádanému výnosu z investice. U daného referenčního scénáře se jako nejméně výhodnější jeví varianta s vyspělým a nejvíce účinným algoritmem FLC. Toto řešení dosahuje nejlepší výsledků u všech uvažovaných cen elektřiny i diskontů. Z toho tedy plyne, že u zdrojů s velkými instalovanými výkony by se vyplatila investice do vývoje měniče s lepším řídicím algoritmem. Hlavním parametrem při výběru měniče, pro zdroje velkých výkonů, tedy bude jeho účinnost a nikoli pořizovací cena, tak jak je tomu u varianty s malým instalovaným výkonem.

Poslední uvažovanou variantou je výměna stávajícího měniče, u již zprovozněné FVE, za měnič s vyšší přesností sledování bodu maxima. Tato výměna by pak přinesla zvýšení výroby, potažmo zvýšení výnosů. Instalovaný výkon je zvolen stejně jako u předchozí varianty na 330 kWp. Uvažujeme zdroj uvedený do provozu v ČR mezi 1.1.2008 až 31.12.2008. Výkupní ceny elektřiny jsou státem garantovány po dobu 20 let a jejich hodnotu určuje každý rok ERÚ. Výměnu měniče uvažujeme na počátku roku 2019, tedy v půlce životnosti projektu. Předpokládáme, že stávající měnič využívá řešení s algoritmem P&O-D, výroba této varianty je tedy brána jako referenční. Jak je vidět z tabulky 23, jediné řešení, které by přineslo významné zvýšení výroby, je varianta s algoritmem FLC. Nicméně po výpočtu NPV je zřejmé, že zvýšení výnosů spojených s větší výrobou nevykompenzuje počáteční investici do nového měniče. A to ani pokud bychom uvažovali prodej stávajícího měniče za cenu 250 000 Kč. Pokud by se však podařilo prodat starý měnič za cenu 500 000 Kč, vyšlo by už NPV varianty s FLC kladné, nicméně jeho hodnota je pouhých 57 310 Kč, tato částka by velice pravděpodobně byla menší než náklady spojené s celkovým procesem výměny měniče. Je také nutné poznamenat, že není vůbec jisté, zdali by se starý měnič podařilo předprodat. Z výše uvedeného tedy vyplývá, že provozovatel daného zdroje by se nejspíše nerozhodl pro výměnu měniče za žádných okolností.

Zdroje

- [1] „Vliv akumulace elektrické energie na provoz fotovoltaické elektrárny (EffectsoftheAccumulationofElectricity on theOperationofPhotovoltaicPowerPlants)". [Online]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/cz/clanky/energetika--vykonova-elektronika--elektrotechnologie/15/vliv-akumulace-elektricke-energie-na-provoz-fotovoltaicke-elektrarny--effects-of-the-accumulation-of-electricity-on-the-operation-of-photovoltaic-power-plants/>. [Viděno: 02-led-2019].
- [2] M. Klein, „Návrh a provozování solární diagnostické laboratoře".
- [3] E. C. Kern, E. M. Gulachenski, a G. A. Kern, „Cloudeffects on distributedphotovoltaicgeneration: slowtransientsattheGardner, Massachusetts photovoltaic experiment", *IEEE Trans. EnergyConvers.*, roč. 4, č. 2, s. 184–190, čer. 1989.
- [4] M. J. E. Alam, K. M. Muttaqi, a D. Sutanto, „A Novel Approachfor Ramp-RateControlof Solar PV UsingEnergyStorage to Mitigate Output FluctuationsCaused by CloudPassing", *IEEE Trans. EnergyConvers.*, roč. 29, č. 2, s. 507–518, čer. 2014.
- [5] X. Li, D. Hui, a X. Lai, „BatteryEnergyStorage Station (BESS)-BasedSmoothingControlofPhotovoltaic (PV) and WindPowerGenerationFluctuations", *IEEE Trans. Sustain. Energy*, roč. 4, č. 2, s. 464–473, dub. 2013.
- [6] „pveducation.org, IV curve". .
- [7] „Solar cell electrical model fromdatasheet". [Online]. Dostupné z: <https://electronics.stackexchange.com/questions/181430/solar-cell-electrical-model-from-datasheet>.
- [8] B. Schwaber, „Solar cells and power, Part 2 – powerextraction". [Online]. Dostupné z: <https://www.powelectronicstips.com/solar-cells-power-part-2-power-extraction/>.
- [9] B. Bendib, H. Belmili, a F. Krim, „A surveyofthe most used MPPT methods: Conventional and advancedalgorithmsappliedforphotovoltaicsystems", *Renew. Sustain. EnergyRev.*, roč. 45, s. 637–648, kvě. 2015.
- [10] D. Sera, „Maximum Power Point Tracking (MPPT) for PV systems".
- [11] *TU Delft, Solar Energy video course*. .
- [12] N. Karami, N. Moubayed, a R. Outbib, „General review and classificationofdifferent MPPT Techniques", *Renew. Sustain. EnergyRev.*, roč. 68, s. 1–18, úno. 2017.
- [13] R. Faranda a S. Leva, „Energycomparisonof MPPT techniquesfor PV Systems", roč. 3, č. 6, s. 11, 2008.
- [14] D. Sera, T. Kerekes, R. Teodorescu, a F. Blaabjerg, „Improved MPPT AlgorithmsforRapidlyChangingEnvironmentalConditions", in *2006 12th International PowerElectronics and MotionControlConference, 2006*, s. 1614–1619.
- [15] J. P. Ram, T. S. Babu, a N. Rajasekar, „A comprehensivereview on solar PV maximum power point trackingtechniques", *Renew. Sustain. EnergyRev.*, roč. 67, s. 826–847, led. 2017.
- [16] L. Bouselham, B. Hajji, a H. Hajji, „Comparative study ofdifferent MPPT methodsforphotovoltaicsystem", in *2015 3rd International Renewable and SustainableEnergyConference (IRSEC)*, Marrakech, Morocco, 2015, s. 1–5.
- [17] Md. S. H. Sunny, A. N. R. Ahmed, a Md. K. Hasan, „Design and simulationof maximum power point trackingofphotovoltaicsystemusing ANN", in *2016 3rd International Conference on ElectricalEngineering and InformationCommunication Technology (ICEEICT)*, Dhaka, Bangladesh, 2016, s. 1–5.
- [18] A. Arora a P. Gaur, „AI based MPPT methodsforgridconnected PV systemsunder non linearchangingsolarirradiation", in *2015 International Conference on Advances in ComputerEngineering and Applications*, Ghaziabad, India, 2015, s. 542–547.

- [19] R. Ahmad, A. F. Murtaza, a H. A. Sher, „Power tracking techniques for efficient operation of photovoltaic array in solar applications – A review“, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, roč. 101, s. 82–102, bře. 2019.
- [20] Md. R. Islam, Y. Guo, a J. Zhu, *Power Converters for Medium Voltage Networks*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014.
- [21] *Advances in solar photovoltaic power plants*. New York, NY: Springer Berlin Heidelberg, 2016.
- [22] T. Kerekes, R. Teodorescu, P. Rodriguez, G. Vazquez, a E. Aldabas, „A New High-Efficiency Single-Phase Transformerless PV Inverter Topology“, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, roč. 58, č. 1, s. 184–191, led. 2011.
- [23] „Comparison and Analysis of Single-Phase.pdf“ . .
- [24] Ing. Bronislav Bechník, Ph.D., „Střídač pro fotovoltaickou elektrárnu. Jakou technologii zvolíte?“ [Online]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/9555-stridac-pro-fotovoltaickou-elektrarnu-jakou-technologie-zvolite>.
- [25] R. Bründlinger, N. Henze, H. Häberlin, B. Burger, A. Bergmann, a F. Baumgartner, „prEN 50530 – THE NEW EUROPEAN STANDARD FOR PERFORMANCE CHARACTERISATION OF PV INVERTERS“, s. 6.
- [26] O. Ezinwanne, F. Zhongwen, a L. Zhijun, „Energy Performance and Cost Comparison of MPPT Techniques for Photovoltaics and other Applications“, *Energy Procedia*, roč. 107, s. 297–303, úno. 2017.
- [27] N. Khaehintung, T. Wiangtong, a P. Sirisuk, „FPGA Implementation of MPPT Using Variable Step-Size P&O Algorithm for PV Applications“, in *2006 International Symposium on Communications and Information Technologies*, Bangkok, Thailand, 2006, s. 212–215.
- [28] T. Radjai, L. Rahmani, S. Mekhilef, a J. P. Gaubert, „Implementation of a modified incremental conductance MPPT algorithm with direct control based on a fuzzy duty cycle change estimator using dSPACE“, *Sol. Energy*, roč. 110, s. 325–337, pro. 2014.
- [29] X. Li, H. Wen, Y. Hu, a L. Jiang, „A novel beta parameter based fuzzy logic controller for photovoltaic MPPT application“, *Renew. Energy*, roč. 130, s. 416–427, led. 2019.
- [30] „iftechshop“. [Online]. Dostupné z: <https://shop.iftech.cz/solarni-menice/153-solarni-menic-abb-pvi-5000-tl-outd.html>.
- [31] „Nový trend: V Česku se připravuje až 60 MW velkých solárů bez podpory. Vyplatí se?“ [Online]. Dostupné z: <http://www.solarninovinky.cz/?zpravy/2019043001/novy-trend-v-cesku-se-pripravuje-az-60-mw-velkych-solaru-bez-podpory-vyplati-se>.
- [32] „Cenové rozhodnutí č. 5/2009, ERÚ“ . .
- [33] „Cenové rozhodnutí č. 6/2018, ERÚ“ . .
- [34] „RŮZNÉ ZPŮSOBY JAK SPOČÍTAT MÍRU RŮSTU“. [Online]. Dostupné z: <https://www.febmat.com/clanek-ruzne-zpusoby-jak-spocitat-miru-rustu/>.

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Simulace dodávaného výkonu P pro ideální slunečný den, P - modrá křivka, [1] ...	12
Obrázek 2 - Dodávaný výkon P (modrá křivka) pro den s proměnnou oblačností, [1]	13
Obrázek 3 - Závislost intenzity osvětlení na fázích zastínění, [2]	13
Obrázek 4 - Typický průběh G z dne s proměnlivou oblačností, [3].....	14
Obrázek 5 - Klasický průběh G z dne s proměnlivou oblačností, [4]	15
Obrázek 6 – Průběh G při zastínění panelu nehomogenním mrakem, [3].....	15
Obrázek 7 - Ozářená dioda, [6]	16
Obrázek 8 - VA charakteristika solárního článku, [6]	16
Obrázek 9 - VA charakteristika solárního článku, I_{sc} a V_{oc} , [7].....	17
Obrázek 10 - PV charakteristika solárního článku, $MPP=P_{max}$, [8]	17
Obrázek 11 - VA charakteristika FV panelu v závislosti na G a T, [9]	18
Obrázek 12 - PV charakteristika FV panelu v závislosti na G a T, [9].....	18
Obrázek 13 - PV charakteristiky solárního panelu v závislosti na G s vyznačením MPP, [10]	19
Obrázek 14 – VA charakteristiky solárního panelu v závislosti na G s vyznačením MPP, [10]...	20
Obrázek 15 - Zmatení algoritmu při rychlé změně G, [11].....	22
Obrázek 16 - Schéma algoritmu P&O, [10]	23
Obrázek 17- Grafické znázornění algoritmu INC, [11]	24
Obrázek 18 - Schéma algoritmu INC, [11]	25
Obrázek 19 - Lingvistické proměnné, [12]	26
Obrázek 20 - Pravdivostní tabulka pro FLC, [12]	26
Obrázek 21 - struktura ANN, [12].....	26
Obrázek 22 - Průběhy G použité při simulacích v [13]	27
Obrázek 23 - Použitý průběh pro stanovení η_{dyn} , [9]	33
Obrázek 24 - Schéma řízení měniče pomocí MPPT, [8]	40
Obrázek 25 - Obvodové schéma dvou stupňového měniče, [22]	41
Obrázek 26 - Obvodové schéma třístupňového měniče, [22]	41
Obrázek 27 - Účinnostní křivka měniče, [24]	42
Obrázek 28 - Obvodové schémata střídačů, [22]	43
Obrázek 29 - Průběhy účinností jednotlivých obvodových řešení 1-f beztransf. střídače, [22] .	43

Seznam tabulek

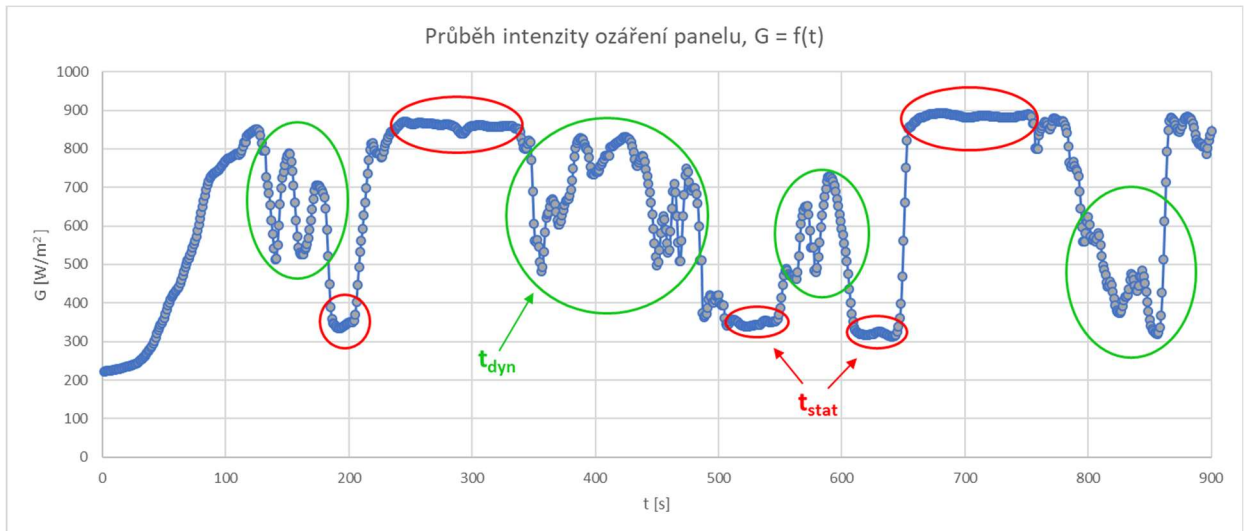
Tabulka 1 - Tabulka typických hodnot pro oblaka a vypočítané časy, [2].....	14
Tabulka 2 - Účinnosti daných algoritmů při dynamických změnách G, [13]	28
Tabulka 3 - Statické účinnosti algoritmů	31
Tabulka 4 - Dynamické a statické účinnosti po přepočtu	32
Tabulka 5 - Nakonec použité dynamické a statické účinnosti algoritmů.....	33
Tabulka 6 - Účinnosti algoritmů při jednotlivých typech dnů a ročních obdobích,	36
Tabulka 7 - Porovnání účinností algoritmů pro jednotlivé typy dne při letním období.....	37
Tabulka 8 - Počet jednotlivých typů dnů za rok	38
Tabulka 9 - Účinnosti pro jednotlivé roční období, celková roční účinnost.....	39
Tabulka 10 - Celková roční účinnost MPPT, potažmo ztrát	39
Tabulka 11 - Přehled parametrů ovlivňujících cenu daného řešení.....	45
Tabulka 12 - Roční výroba zdroje 5kWp pro jednotlivé typy algoritmů	47
Tabulka 13 - Roční výroba zdroje 330 kWp pro jednotlivé typy algoritmů.....	48
Tabulka 14 - Odhady cen za řídicí část obvodu.....	50
Tabulka 15 - Postup výpočtu ceny za zbylou část měniče	50
Tabulka 16 - Zpětný přepočet na cenu s DPH	50
Tabulka 17 - Výpočet NPV, varianta malého výkonu, $P = 3 \text{ Kč/kWh}$, $r = 3\%$	53
Tabulka 18 - Citlivostní analýza ceny elektřiny	54
Tabulka 19 - Citlivostní analýza diskontu	55
Tabulka 20 - Výpočet NPV, varianta komerční FVE, $P = 1,1 \text{ Kč/kWh}$, $r = 7\%$	57
Tabulka 21 - Citlivostní analýza ceny elektřiny, velký výkon.....	58
Tabulka 22 - Citlivostní analýza diskontu, velký výkon	59
Tabulka 23 - Změna ve výrobě oproti stávajícímu měniči, P&O	60
Tabulka 24 - Výpočet NPV při uvažované výměně měniče, bez prodeje stávajícího.....	61
Tabulka 25 - Výpočet NPV při uvažované výměně měniče, prodeje stávajícího za 250 000 Kč .	61
Tabulka 26 - Výpočet NPV při uvažované výměně měniče, prodeje stávajícího za 500 000 Kč .	61

Seznam grafů

Graf 1 - Citlivostní analýza ceny elektřiny, malý výkon.....	54
Graf 2 - Přiblížení oblasti grafu 1.....	54
Graf 3 - Citlivostní analýza velikosti diskontu, malý výkon	55
Graf 4 - Přiblížení oblastí grafu 3.....	55
Graf 5 - Citlivostní analýza ceny elektřiny, velký výkon	58
Graf 6 - Přiblížení oblastí grafu 5.....	58
Graf 7 - Citlivostní analýza velikosti diskontu, velký výkon.....	59
Graf 8 - Přiblížení oblastí grafu 7.....	59

Seznam příloh

Příloha 1 - Ukázka určování t_{sat} a t_{dyn} z osvitových dat z UCEEBu.....	70
Příloha 2 - Parametry měniče použitého při simulaci v programu SAM, malý výkon.....	71
Příloha 3 - Parametry měniče použitého při simulaci v programu SAM, velký výkon	71
Příloha 4 - Tabulky pro určení cen řídicích částí obvodů, malý výkon	73
Příloha 5 - Tabulky pro určení cen řídicích částí obvodů, velký výkon.....	73
Příloha 6 - Faktura za elektřinu, Dubeč.....	73
Příloha 7 - Faktura za elektřinu, Barrandov	73
Příloha 8 - Faktura za elektřinu, Strašnice.....	73



Příloha 1 - Ukázka určování t_{stat} a t_{dyn} z osvitových dat z UCEEBu

SAM 2017.1.17: C:\Users\lenovo\Desktop\VS\6. Semestr\BAP\Články\06 Výpočet E\P&O.sam

File Add Fuzzy P&O

Photovoltaic, Residential

Location and Resource

Module

Inverter

System Design

Shading and Snow

Losses

Lifetime

Battery Storage

System Costs

Financial Parameters

Incentives

Electricity Rates

Electric Load

Inverter CEC Database

Search for: Name

Name	Paco	Vac	Mppt_low	Mppt_high	Vdco	Vdcmx
ABB: PVI-5000-OUTD-US (208V) 208V [CEC 2016]	5000	208	100	480	310	480
ABB: PVI-5000-OUTD-US (240V) 240V [CEC 2016]	5000	240	100	480	345	480
ABB: PVI-5000-OUTD-US (277V) 277V [CEC 2016]	5000	277	100	480	400	480
ABB: PVI-5000-OUTD-US-A (208V) 208V [CEC 2016]	5000	208	100	480	310	480
ABB: PVI-5000-OUTD-US-A (240V) 240V [CEC 2016]	5000	240	100	480	345	480

Efficiency Curve and Characteristics

ABB: PVI-5000-OUTD-US (240V) 240V [CEC 2016]

CEC weighted efficiency 96.318 %

European weighted efficiency 95.819 %

Maximum AC power	5000 Wac	C0	-3.54808e-006	1/Wac
Maximum DC power	5190.29 Wdc	C1	-1.04592e-005	1/Vdc
Power consumption during operation	32.0358 Wdc	C2	0.000444984	1/Vdc
Power consumption at night	0.24 Wac	C3	-0.000412078	1/Vdc
Nominal AC voltage	240 Vac			
Maximum DC voltage	480 Vdc			
Maximum DC current	0.0104167 Adc			
Minimum MPPT DC voltage	100 Vdc			
Nominal DC voltage	345 Vdc			
Maximum MPPT DC voltage	480 Vdc			

Note: If you are modeling a system with microinverters or DC power optimizers, see the "Losses" page to adjust the system losses accordingly.

Příloha 2 - Parametry měniče použitého při simulaci v programu SAM, malý výkon

SAM 2017.1.17: C:\Users\lenovo\Desktop\VS\6. Semestr\BAP\Články\06 Výpočet E\FLC_Big_bez trafa loss_1.00.sam

File Add FLC_Big_bez trafa loss_1.00 untitled

Photovoltaic, Commercial

Location and Resource

Module

Inverter

System Design

Shading and Snow

Losses

Lifetime

Battery Storage

System Costs

Financial Parameters

Incentives

Electricity Rates

Electric Load

Inverter CEC Database

Search for: Name

Name	Paco	Vac	Mppt_low	Mppt_high	Vdco	Vdcmx
ABB: PVI-CENTRAL-100-US (480V) 480V [CEC 2016]	100000	480	330	480	370	480
ABB: PVI-CENTRAL-250-US (480V) 480V [CEC 2016]	250000	480	320	480	360	480
ABB: PVI-CENTRAL-250-US 480V [CEC 2011]	250000	480	320	550	360.4488889	600
ABB: PVI-CENTRAL-300-US (480V) 480V [CEC 2016]	300000	480	320	480	360	480
ABB: PVI-CENTRAL-300-US 480V [CEC 2011]	300000	480	320	550	360.7749206	600

Efficiency Curve and Characteristics

ABB: PVI-CENTRAL-300-US (480V) 480V [CEC 2016]

CEC weighted efficiency 96.992 %

European weighted efficiency 96.892 %

Maximum AC power	300000 Wac	C0	-8.3166e-008	1/Wac
Maximum DC power	311353 Wdc	C1	4.59182e-005	1/Vdc
Power consumption during operation	1000.16 Wdc	C2	0.00125909	1/Vdc
Power consumption at night	119 Wac	C3	-0.00124165	1/Vdc
Nominal AC voltage	480 Vac			
Maximum DC voltage	480 Vdc			
Maximum DC current	0.625 Adc			
Minimum MPPT DC voltage	320 Vdc			
Nominal DC voltage	360 Vdc			
Maximum MPPT DC voltage	480 Vdc			

Note: If you are modeling a system with microinverters or DC power optimizers, see the "Losses" page to adjust the system losses accordingly.

Příloha 3 – Parametry měniče použitého při simulaci v programu SAM, velký výkon

Hardware														Software				Benefity	
[Počet a typ součástek]														[Dny práce]				[Kč]	
Algoritmus	U sensor	I sensor	OZ	Komparator	A/D převodník	Mikroprocesor	GATE DRIVER	RLC - prvky	S	D	Náročnost	Komplexnost vývoje	Display	RS-485	Benefity				
Bez MPPT	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	Ne	Ne			
P&O-A	1	1	2	2	0	0	1	8	1	3	2	1	10	10					
P&O-D	1	1	2	0	2	XC2C384		1	8	1	3	1	10						
P&O-D'	1	1	2	0	2	?													
INC	1	1	2	0	2	DSP TMS320F240		1	8	1	3	1	2	20	Ano	Ano			
FLC	1	1	2	0	2	DSP TMS320F28335		1	8	1	3	1	2	130					
Cena	400 Kč	400 Kč	30 Kč	30 Kč	100 Kč	Záleží na variantě	50 Kč	150 Kč	200 Kč	20 Kč	20 Kč	8000 Kč/den	500 Kč	500 Kč	500 Kč	500 Kč			

Hardware														Software				Benefity	
[Počet a typ součástek]														[Dny práce]				[Kč]	
Algoritmus	U sensor	I sensor	OZ	Komparator	A/D převodník	Mikroprocesor	GATE DRIVER	RLC - prvky	S	D	Náročnost	Komplexnost vývoje	Display	RS-485	Benefity				
Bez MPPT	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8 Kč	500 Kč	500 Kč	1 028 Kč			
P&O-A	400 Kč	400 Kč	60 Kč	60 Kč	0 Kč	0 Kč	50 Kč	150 Kč	200 Kč	40 Kč	8 Kč	8 Kč	80 Kč	500 Kč	500 Kč	2 448 Kč			
P&O-D	400 Kč	400 Kč	60 Kč	0 Kč	200 Kč	200 Kč	50 Kč	150 Kč	200 Kč	40 Kč	8 Kč	8 Kč	80 Kč	0 Kč	0 Kč	1 788 Kč			
P&O-D'	400 Kč	400 Kč	60 Kč	0 Kč	200 Kč	350 Kč	50 Kč	150 Kč	200 Kč	40 Kč	8 Kč	8 Kč	80 Kč	0 Kč	0 Kč	1 938 Kč			
INC	400 Kč	400 Kč	60 Kč	0 Kč	200 Kč	400 Kč	50 Kč	150 Kč	200 Kč	40 Kč	16 Kč	16 Kč	160 Kč	0 Kč	0 Kč	2 076 Kč			
FLC	400 Kč	400 Kč	60 Kč	0 Kč	200 Kč	1 300 Kč	50 Kč	150 Kč	200 Kč	40 Kč	72 Kč	72 Kč	1 040 Kč	0 Kč	0 Kč	3 912 Kč			

Příloha 4 - Tabulky pro určení cen řídicích částí obvodů, malý výkon

Hardware														Software a návrh				Benefity	
[Počet a typ součástek]														[Dny práce]				[Kč]	
Algoritmus	U sensor	I sensor	OZ	Komparator	A/D převodník	Mikroprocesor	GATE DRIVER	RLC - prvky	S	D	Náročnost	Komplexnost vývoje	Display	RS-485	Benefity				
Bez MPPT	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	Ne	Ne			
P&O-A	1	1	3	2	0	0	1	8	1	3	2	1*	10	10					
P&O-D	1	1	2	0	2	XC2C384		1	8	1	3	1	2	1	10				
P&O-D'	1	1	2	0	2	?		1	8	1	3	1	2	1	10				
INC	1	1	2	0	2	DSP TMS320F240		1	8	1	3	1	2	20	Ano	Ano			
FLC	1	1	2	0	2	DSP TMS320F28335		1	8	1	3	1	2	9					
Cena	400 Kč	400 Kč	30 Kč	30 Kč	100 Kč	Záleží na variantě	50 Kč	150 Kč	650 Kč	120 Kč	120 Kč	8000 Kč/den	5000 Kč	5000 Kč	5000 Kč	5000 Kč			

Hardware														Software a návrh				Benefity	
[Počet a typ součástek]														[Dny práce]				[Kč]	
Algoritmus	U sensor	I sensor	OZ	Komparator	A/D převodník	Mikroprocesor	GATE DRIVER	RLC - prvky	S	D	Náročnost	Komplexnost vývoje	Display	RS-485	Benefity				
Bez MPPT	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20 Kč	5000 Kč	5000 Kč	10 140 Kč			
P&O-A	400 Kč	400 Kč	90 Kč	60 Kč	0 Kč	0 Kč	50 Kč	150 Kč	650 Kč	240 Kč	8 Kč	8 Kč	200 Kč	5000 Kč	5000 Kč	12 248 Kč			
P&O-D	400 Kč	400 Kč	60 Kč	0 Kč	200 Kč	200 Kč	50 Kč	150 Kč	650 Kč	240 Kč	20 Kč	20 Kč	200 Kč	0 Kč	0 Kč	2 570 Kč			
P&O-D'	400 Kč	400 Kč	60 Kč	0 Kč	200 Kč	350 Kč	50 Kč	150 Kč	650 Kč	240 Kč	20 Kč	20 Kč	200 Kč	0 Kč	0 Kč	2 720 Kč			
INC	400 Kč	400 Kč	60 Kč	0 Kč	200 Kč	400 Kč	50 Kč	150 Kč	650 Kč	240 Kč	40 Kč	40 Kč	400 Kč	0 Kč	0 Kč	2 990 Kč			
FLC	400 Kč	400 Kč	60 Kč	0 Kč	200 Kč	1 300 Kč	50 Kč	150 Kč	650 Kč	240 Kč	180 Kč	180 Kč	2 600 Kč	0 Kč	0 Kč	6 230 Kč			

Příloha 5 - Tabulky pro určení cen řídicích částí obvodů, velký výkon

PŘEHLED PLATEB				
	Účtované množství	Průměrná jednotková cena (bez DPH)	Částka celkem (bez DPH)	Částka celkem (s DPH)
Vysoký tarif (VT)	2.864,00 kWh	2,99 Kč/kWh	8.562,77 Kč	10.360,95 Kč
Ostatní související služby	2.864,00 kWh	0,61 Kč/kWh	1.756,73 Kč	2.125,64 Kč
Položky nezávislé na množství	11,94 měs	169,09 Kč/měs	2.018,26 Kč	2.442,09 Kč
			Souhrn částek celkem (s DPH)	14.928,69 Kč

Příloha 4 - Faktura za elektřinu, Dubeč

PŘEHLED PLATEB za celkové období 11.7.2017 - 9.7.2018

Účtované množství	Jednotka	Tarif	Průměrná jednotková cena (bez DPH)**	Celkem bez DPH	Celkem s DPH*
4210	kWh	VT (T1, I)	3,32 Kč/kWh	13 988,76 Kč	16 926,40 Kč
11,97	měsíc		160,61 Kč/měsíc	1 922,49 Kč	2 326,21 Kč
Celkem				15 911,25 Kč	19 252,61 Kč

* Haléřový rozdíl (proti částce na prvním listu vyúčtování) může být / je způsoben zaokrouhlováním.

** Vypočítáno dle vyhlášky č. 70/2016 Sb. podílem částky celkem bez DPH a účtovaného množství.

Příloha 5 - Faktura za elektřinu, Barrandov

Cenový přehled, včetně regulovaných služeb a ostatních daní			
Účtované množství	Průměrná jednotková cena (bez DPH)	Celkem CZK (bez DPH)	Celkem CZK (s DPH)
VT 781 kWh	2,31 CZK/kWh	1.800,57	2.178,88
NT 7648 kWh	1,94 CZK/kWh	14.841,93	17.960,38
11,97 měsíců	361,48 CZK/měsíc	4.326,91	5.236,04
Souhrn částek celkem (s DPH)			25.375,30

Příloha 6 - Faktura za elektřinu, Strašnice