

Fakulta elektrotechnická
Katedra elektroenergetiky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Připojení fotovoltaických panelů k síti pomocí
vícehladinového měniče

Autor práce: **Bc. Jakub Lodr**
Vedoucí práce: **doc. Ing. Tomáš Komrška, Ph.D.**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2022/2023

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Jakub LODR**
Osobní číslo: **E21N0009K**
Studijní program: **N0714A060017 Aplikovaná elektrotechnika**
Téma práce: **Připojení fotovoltaických panelů k síti pomocí vícehladinového měniče**
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky**

Zásady pro vypracování

1. Sestavte laboratorní prototyp kaskádního vícehladinového měniče, kde každý stejnosměrný obvod je napájen samostatně malým fotovoltaickým panelem.
2. Navrhněte algoritmy řízení vícehladinového měniče, které zajistí maximální výtěžnost jednotlivých fotovoltaických panelů (MPPT) a generaci jednofázového napětí požadované velikosti a frekvence.
3. Proveďte implementaci navržených algoritmů pomocí řídicí jednotky s mikrokontrolérem.
4. Proveďte měření na oživeném laboratorním prototypu připojeném k jednofázové síti a proveďte zhodnocení přínosu vícehladinového měniče vůči běžně rozšířené technologii dvouhladinového měniče napájeného sériově spojenými fotovoltaickými panely.

Rozsah diplomové práce: **40 – 60**
Rozsah grafických prací:
Forma zpracování diplomové práce: **elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. P. M. Lingom, J. Song-Manguelle, D. L. Mon-Nzongo, R. C. C. Flesch and T. Jin, „Analysis and Control of PV Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter With Failed Cells and Changing Meteorological Conditions,“ in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 36, no. 2, pp. 1777-1789, Feb. 2021, doi: 10.1109/TPEL.2020.3009107.

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Tomáš Komrška, Ph.D.**
Research and Innovation Centre for Electrical
Engineering

Datum zadání diplomové práce: **7. října 2022**
Termín odevzdání diplomové práce: **26. května 2023**


Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan



Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 7. října 2022

Abstrakt

V této kvalifikační práci je prezentován návrh laboratorního prototypu vícehladinového měniče, který slouží pro připojení fotovoltaické elektrárny k síti. V úvodu práce jsou popsány základní vlastnosti navrženého řešení a dále jsou uvedeny algoritmy řízení a matematický model vícehladinového střídače. Cílem práce je porovnat výkon navrhovaného kaskádního měniče s běžně rozšířenou technologií sériově spojených panelů a jednoho střídače. Výstupy jednotlivých prvků kaskády jsou spojeny sériově a výsledný signál je přenášen do jednofázové sítě. Tento přístup umožňuje získat energii s vyšší účinností a minimalizovat negativní vliv zastínění fotovoltaických panelů. V rámci práce byla provedena simulace, vytvořen prototyp a naměřena data za různých podmínek. Závěr práce obsahuje porovnání navrhované technologie s běžně užívanou a zhodnocení přínosů navrženého řešení.

Klíčová slova

Vícehladinový střídač, H-můstek, MPPT, SOGI, fotovoltaika

Abstract

This qualification thesis presents a design of a laboratory prototype of a multilevel converter that is used for connecting a photovoltaic power plant to the grid. The introductory section describes the basic properties of the proposed solution, and algorithms for controlling the multilevel inverter and its mathematical model are also presented. The aim of the work is to compare the performance of the proposed cascaded converter with the commonly used technology of serially connected panels and single inverter. The outputs of the individual elements of the cascade are connected in series, and the resulting signal is transmitted to a single-phase grid. This approach allows for obtaining energy with higher efficiency and minimizing the negative impact of shading on photovoltaic panels. Simulations were conducted, a prototype was built, and data were measured under different conditions as part of this work. The conclusion includes a comparison of the proposed technology with the commonly used one and an evaluation of the benefits of the proposed solution.

Key words

Multilevel inverter, H-bridge, MPPT, SOGI, photovoltaics

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Připojení FVE pomocí vícehladinového měniče	2
2.1	Srovnání dvou a více úrovněového měniče.....	3
2.2	Kaskádní víceúrovňový střídač	4
2.3	Charakteristiky fotovoltaického panelu.....	6
2.4	Algoritmy řízení	8
2.4.1	Pulsně šířková modulace (PWM).....	9
2.4.2	Algoritmy MPPT.....	10
2.4.3	Synchronizace s napětím sítě	14
2.4.4	Proporcionálně rezonanční regulátor	16
2.4.5	Finální algoritmus řízení	16
3	Matematický model	17
3.1	Kaskádní měnič (5-CHB) se dvěma H-můstky	18
3.1.1	Parametry simulace se zdroji konstantního napětí	18
3.1.2	Výsledky simulace se zdroji konstantního napětí	19
3.1.3	Parametry simulace s fotovoltaickými panely.....	22
3.1.4	Výsledky simulace s fotovoltaickými panely – kaskádní měnič.....	24
3.1.5	Výsledky simulace s fotovoltaickými panely – FV panely zapojeny v sérii .	26
3.2	Dílčí závěr.....	27
4	Laboratorní prototyp	28
4.1	Sestavený prototyp	28
4.2	Experimentální výsledky	31
4.2.1	Výsledky se zdroji konstantního napětí	31
4.2.2	Výsledky experimentálního měření s FV panely	35
5	Závěr	43

Seznam obrázků

Obr. 2.1 Navrhované zapojení FVE s vícehladinovým kaskádním měničem (CHB) připojené k 1f síti	2
Obr. 2.2 Průběh fázového napětí dvouúrovňového měniče (nahore) a tříúrovňového měniče (dole).....	3
Obr. 2.3 Pětihladinový kaskádní střídač	5
Obr. 2.4 Charakteristiky proudu a výkonu solárního panelu v závislosti na napětí a osvětlení panelu (Matlab/Simulink) 6	6
Obr. 2.5 Charakteristiky proudu a výkonu solárního panelu v závislosti na napětí a okolní teplotě (Matlab/Simulink)7	7
Obr. 2.6 Blokový diagram měniče s řídicími bloky	8
Obr. 2.7 Blokový diagram PWM pro spínání pěti hladinového měniče	9
Obr. 2.8 Vstupní signály PWM (nahore) a výstupní napětí střídače naprázdno (dole) pro pěti hladinový měnič	9
Obr. 2.9 Obvyklé zapojení MPPT regulátoru s DC-DC konvertorem (DC zátěž, Matlab Simulink)	10
Obr. 2.10 Vývojový diagram P&O algoritmu (D je střída DC-DC měniče) [6]	11
Obr. 2.11 Vývojový diagram finálního MPPT algoritmu [8].....	13
Obr. 2.12 Blokový diagram algoritmu SOGI pro synchronizaci s napětím sítě.....	14
Obr. 2.13 Finální algoritmus řízení kaskádního měniče se dvěma H-můstky.....	16
Obr. 3.1 Bloky matematického modelu sestaveného v programu Matlab/Simulink	17
Obr. 3.2 Synchronizace se sítí pomocí SOGI: Zavěšování výstupu u_{α} na napětí sítě při spuštění programu	19
Obr. 3.3 Synchronizace se sítí pomocí SOGI: Zavěšování výstupu u_{α} na napětí sítě při spuštění simulace.....	19
Obr. 3.4 Výsledky simulací: Rozběh 5-CHB střídače s napětíovými zdroji na SS straně – systém připojený k 1-fázové síti.....	20
Obr. 3.5 Rozběh 5-CHB střídače s napětíovými zdroji na SS straně (změna U_{AC})	21
Obr. 3.6 Průběh intenzity osvětlení dopadající na konkrétní fotovoltaický panel v čase	23
Obr. 3.7 Průběh napětí, proudu a výkonu panelů v reakci na průběh osvětlení z Obr. 3.6 (2 můstky).....	24
Obr. 3.8 Průběh napětí a proudu na výstupu střídače v ustáleném stavu (U_{AC} – napětí sítě)	25
Obr. 3.9 Průběh požadavků na amplitudu výstupního proudu do sítě od jednotlivých MPPT regulátorů	25
Obr. 3.10 Průběh napětí, proudu a výkonu panelů v reakci na změnu osvětlení viz Obr.3.6 (1 můstek)	26
Obr. 4.1 Schéma zapojení laboratorního prototypu.....	28
Obr. 4.2 Umístění fotovoltaických panelů	29
Obr. 4.3 Řídicí a měřicí část prototypu nalevo, Výkonová část a připojení k síti napravo	29
Obr. 4.4 Experimentální výsledky: Synchronizace se sítí pomocí algoritmu SOGI	31
Obr. 4.5 Experimentální výsledky: Průběh výstupního napětí jednoho můstku naprázdno	31
Obr. 4.6 Experimentální výsledky: Průběhy napětí a proudu pro jeden můstek připojený do sítě (požadavek 2 A) 32	32
Obr. 4.7 Experimentální výsledky: Průběhy napětí a proudu pro jeden můstek připojený do sítě	32
Obr. 4.8 Experimentální výsledky: Průběh výstupního napětí a proudu vícehladinového kaskádního měniče	33
Obr. 4.9 Experimentální výsledky: Průběh výstupního napětí kaskády na prázdko 10V/dílek	33
Obr. 4.10 Experimentální výsledky: Průběhy naměřeného proudu sítě a vstupního požadavku (2A)	34
Obr. 4.11 Experimentální výsledky: Průběhy naměřeného proudu sítě a vstupního požadavku (3A)	34

Obr. 4.12 Experimentální výsledky: Reakce systému sériově spojených FV panelů s jedním můstkem při spuštění spínání.....	35
Obr. 4.13 Experimentální výsledky: Detail výstupních a vstupních průběhů střídače s jedním můstkem.....	36
Obr. 4.14 Experimentální výsledky: Detail výstupních a vstupních průběhů střídače s jedním můstkem.....	36
Obr. 4.15 Průběh el. veličin FV panelů při zastínění. (součet stejnosměrného napětí stringu panelů, proud FV panelů a výkon stringu)	37
Obr. 4.16 Průběh napětí na svorkách střídače a proudu sítě při konstantním osvětlení pro 5CHB,	38
Obr. 4.17 Průběh napětí na svorkách střídače a proudu do zátěže při zastínění jednoho panelu pro 5CHB.....	38
Obr. 4.18 Experimentální měření: Napětí, proud a výkon jednotlivých FV panelů při startu spínání kaskádního měniče.....	39
Obr. 4.19 Experimentální výsledky: Průběh napětí, proudu a výkonu jednotlivých FV panelů kaskádního měniče – zpočátku zastíněný jeden panel a následně přechod do plného výkonu.....	40
Obr. 4.20 Experimentální výsledky: Průběh napětí, proudu a výkonu jednotlivých FV panelů kaskádního měniče – přechod z plného výkonu k zastínění jednoho panelu.....	41
Obr. 4.21 Experimentální výsledky: DFT analýza napětí a proudu sítě pro běžný měnič s panely v sérii a jedním H-můstkem (vlevo) a navrhované řešení s panely zapojenými k jednotlivým H-můstkům kaskádního měniče (5-CHB) (vpravo).....	42

Seznam tabulek

Tabulka 2.1 Spínací kombinace H-můstku	4
Tabulka 2.2 Spínací tabulka pětiúrovňového střídače.....	5
Tabulka 3.1 Parametry simulace pro 5-CHB s napětiovými zdroji	18
Tabulka 3.2 Parametry pro 5-CHB s fotovoltaickými panely	22
Tabulka 3.3 Parametry použitého panelu	22
Tabulka 4.1 Parametry laboratorního prototypu FVE s kaskádním měničem.....	30

Seznam použitých zkratk

CHB	Cascaded H-bridge
MPPT	Maximum Power Point Tracker
MPP	Maximum Power Point
SOGI	Second Order Generalized Integrator
IGBT	Insulated Gate Bipolar Tranzistor
PR	Proporčně Rezonanční
FPGA	Field Programmable Gate Array
MLC	Multilevel Controler
AD/DA	Analog-Digital/Digital-Analog
PV	Photovoltaic
PWM	Pulse Wave Modulation
PI	Proporčně Integrační
PLL	Phase-Locked Loop
DC	Direct Current
CCS	Code Composer Studio
THD	Total Harmonic Distortion
DFT	Discrete Fourier Transformation

Seznam použitých symbolů

U_{DC}	Stejnoseměrné napětí FV panelu
I_{DC}	Stejnoseměrný proud FV panelu
P_{DC}	Stejnoseměrný výkon FV panelu
U_w, u_w	Požadované napětí na střídavé straně měniče
I_w, i_w	Požadovaný proud sítě
U_{AC}	Napětí sítě
I_{AC}	Proud sítě
I_{ph}	Proud úměrný osvětlení
I_{rs}	Reverzní saturační proud článku
n_s, n_p	Počet sériově a paralelně zapojených článků
I_r	Intenzita osvitu
u_α, u_β	Harmonické složky stojícího systému
f_{AC}	Frekvence sítě
L_z	Filtrační indukčnost
R_z	Odpor sítě

1 Úvod

Tato diplomová práce se zaměřuje na sestavení a oživení laboratorního prototypu fotovoltaické elektrárny (FVE). Fotovoltaické panely jsou připojeny k síti pomocí vícehladinového měniče.

Obvyklým řešením bývá sériová kombinace panelů zapojena na stejnosměrnou stranu střídače [1]. Taková topologie vyniká svojí jednoduchostí, ale nese s sebou řadu problémů. V případě, že jeden panel je zastíněný, nebo poškozený, poklesne proud celé smyčky [1]. Snížení výkonu se netýká jen poruch, ale vzniká již rozdílem maximálního výkonu panelu z výroby [2]. Dalším příkladem snížení výkonu je různý sklon dopadu slunečního svitu na jednotlivé panely. Používané řešení jsou například tzv. optimizéry [3], které se připojují k jednotlivým panelům a řídí výstupní napětí panelu tak, aby byl maximálně vytížen.

Navrhovaným řešením je využití vícehladinového měniče v kaskádním zapojení (CHB). Každý panel je připojen na stejnosměrnou stranu vlastního střídače, kdy z panelu je vytěžován maximální výkon nezávisle na výkonu ostatních panelů. Takové zapojení řeší všechny uvedené problémy a dovoluje velkou míru variabilnosti, co se týče rozmístění prvků elektrárny po povrchu. Další výhodou navrhovaného řešení je možnost spojování panelů s různými maximálními výkony.

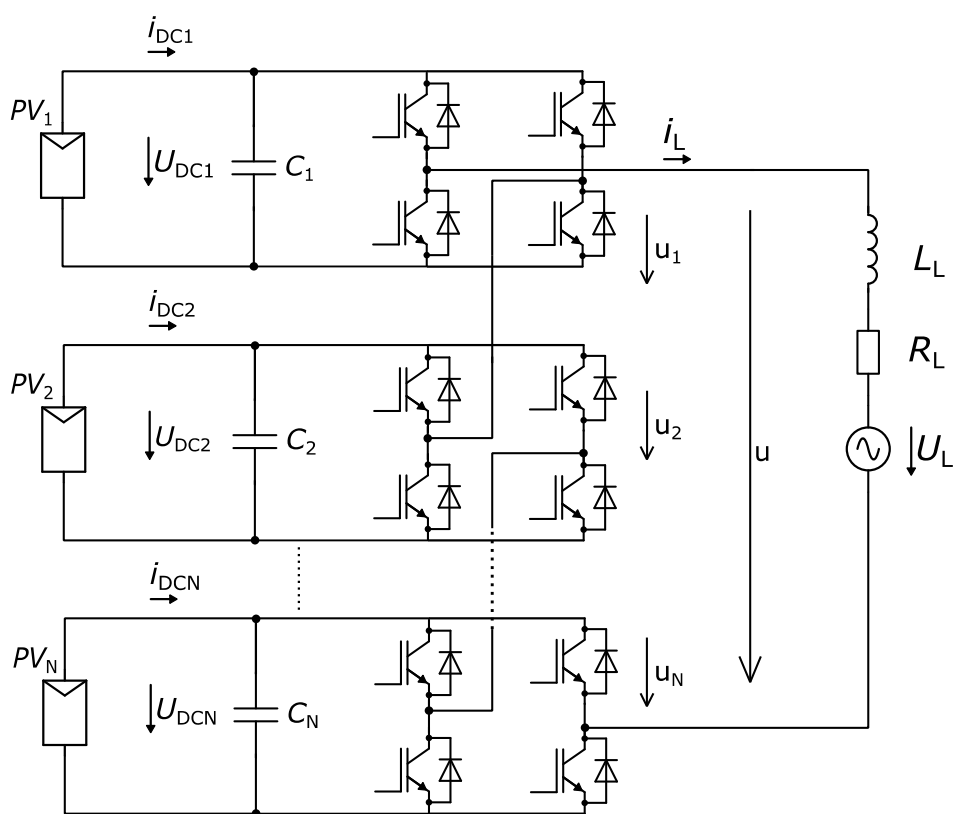
Součástí práce je popis navrhovaného řešení a následný návrh řídicího algoritmu. Před sestavením a otestováním funkce na laboratorním prototypu, je provedena simulace v programu Matlab s pomocí nadstavby Simulink (PLECS).

Jako řídicí jednotka je použitý Multi Level Converter (MLC) interface s procesorem TMS320F28335 [4]. MLC interface je vývojový kit, který byl sestaven za účelem řízení vícehladinových měničů a umožňuje mimo jiné využití FPGA (on Field Programmable Gate Arrays). Práci s MLC interface ulehčují připravené knihovny pro práci s jednotlivými bloky zařízení. Vývojovým prostředím je emulátor Code Composer Studio (CCS).

Výsledky simulace a měření na laboratorním prototypu poslouží k závěrečnému porovnání účinnosti FVE s navrhovaným měničem oproti běžnému systému [5].

2 Připojení FVE pomocí vícehladinového měniče

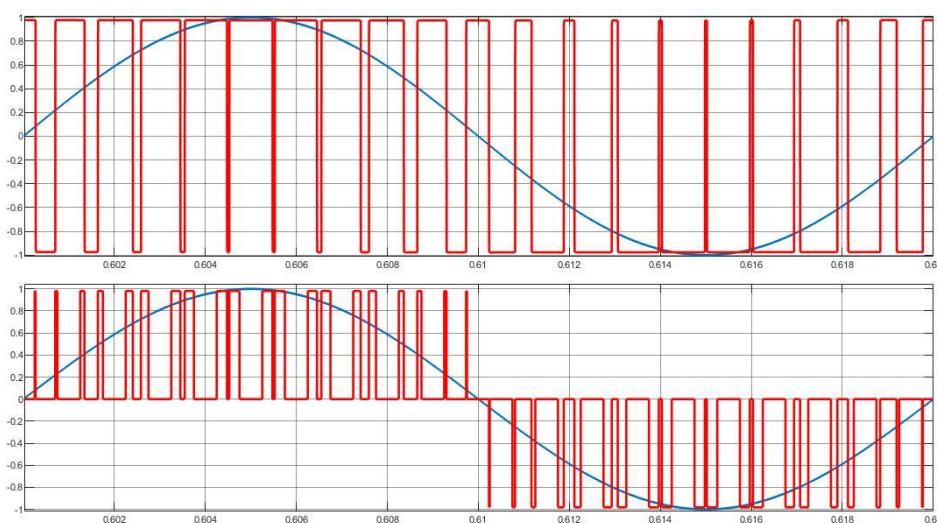
Na obr. 2.1 je vidět navrhované schéma zapojení vícehladinového měniče s fotovoltaickými panely. Schématický blok PV_n reprezentuje samostatný připojený fotovoltaický panel, na kterém lze měřit stejnosměrné napětí U_{DCn} a stejnosměrný proud I_{DCn} tekoucí do kapacity C_n tvořící stejnosměrný meziobvod H-můstku. H-můstek je tvořený IGBT tranzistory s nulovými diodami a výstupní svorky jsou zapojeny do kaskády s dalšími až N stupni střídače. Celkové napětí je přivedeno do jednofázové sítě. Takové zapojení H-můstků tvoří kaskádní vícehladinový měnič odkazovaný v úvodu.



Obr. 2.1 Navrhované zapojení FVE s vícehladinovým kaskádním měničem (CHB) připojené k 1f síti

2.1 Srovnání dvou a více úrovňového měniče

Úrovněmi jsou myšleny hladiny napětí, kterých může v ustáleném stavu výstupní napětí měniče nabývat. Úrovně napětí jsou dané topologií měniče. Obr. 2.2 porovnává výstupní napětí půlmůstku (dvouúrovňové) a H-můstku (tříúrovňové). Vlastností půlmůstku je generovat výstupní napětí o velikosti poloviny U_{DC} , naopak H-můstek přivádí na výstup plné napětí U_{DC} . Na obr. 2.2 jsou zobrazeny obě možnosti a napětí je pro názornost normované na svou maximální amplitudu. Hodnoty vykreslených průběhů nabývají hodnoty od -1 do 1.



Obr. 2.2 Průběh fázového napětí dvouúrovňového měniče (nahore) a tříúrovňového měniče (dole) (Dvouúrovňové napětí normované na hodnotu $U_{DC}/2$, Tříúrovňové na hodnotu U_{DC} , modře řídicí signál)

Mezi hlavní výhody víceúrovňových měničů patří nižší obsah vyšších harmonických při zachování stávající velikosti spínací frekvence a nižší blokovací napětí součástek. Následkem nižšího harmonického zkreslení se také sníží nároky na výstupní filtr.

Zásadní nevýhodu zřejmě představuje vyšší pořizovací cena daná množstvím výkonových polovodičových prvků, složitost systému i řídicího algoritmu [11].

2.2 Kaskádní víceúrovňový střídač

Tato topologie byla popsána již v roce 1975 [7]. Zapojení kaskádního víceúrovňového střídače vychází z kaskádně (sériově) zapojených jednofázových můstků. V topologii lze použít plný H-můstek nebo také půlmůstek a je využíván v širokém spektru aplikací, např. v energetice nebo v oblasti elektrických pohonů. Samotný můstek vytváří na výstupu tříúrovňový signál naznačený v předchozí podkapitole na obr. 2.2 dole. Každý takový můstek je tvořen čtyřmi tranzistory, pro účel střídače s vyšším výkonem IGBT tranzistory se zpětnými diodami, viz obr. 2.1 [6].

Jako první je vhodné popsat funkci tohoto jednoho můstku. Jeden H můstek představuje kombinaci čtyř tranzistorů, viz obr. 2.3. Na vstup střídače je připojené stejnosměrné napětí o hodnotě U_{dc} . V tomto případě je zde zapojená i kapacita C pro udržení velikosti vstupního napětí. Vhodným spínáním tranzistorů signály S_1 - S_4 lze docílit přenesení vstupního napětí U_{dc} na výstup. V tabulce 2.1 je popsáno výstupní napětí v závislosti na spínacích signálech. Byly vynechány zakázané stavy S_1+S_3 a S_2+S_4 , které vedou na zkrat. Zároveň jsou zanedbány ztráty na tranzistorech.

Tabulka 2.1 Spínací kombinace H-můstku

S_1	S_2	S_3	S_4	U_2
1	0	0	1	$+U_{dc}$
0	0	1	1	0
1	1	0	0	0
0	1	1	0	$-U_{dc}$

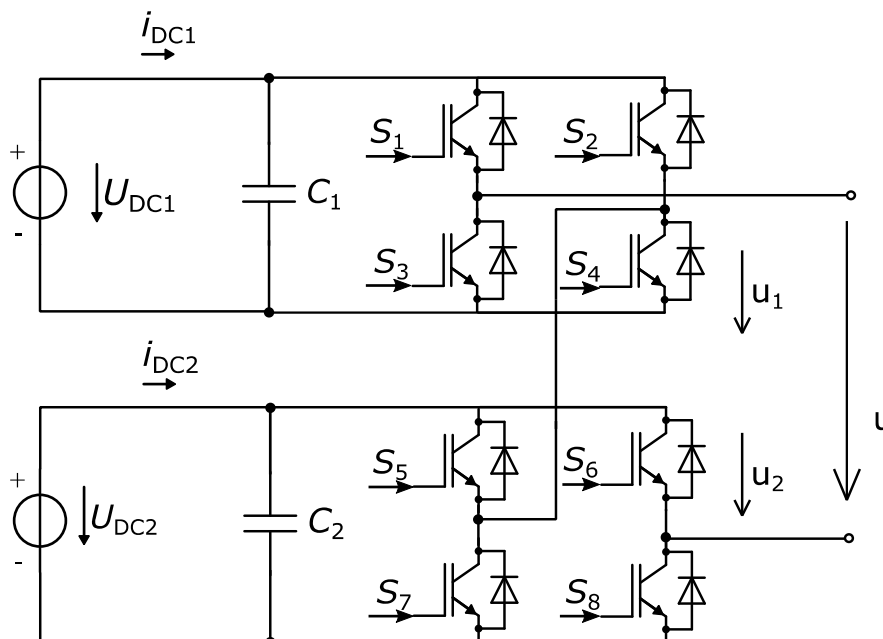
Z tabulky je patrné, že nulové napětí vzniká sepnutím kombinace tranzistorů S_1+S_3 , nebo S_2+S_4 . Tato možnost tvoří třetí hladinu. Další hladiny napětí lze vytvořit právě připojením dalších můstků do kaskády.

Počet úrovní, kterých kaskádní střídač dosáhne lze určit ze vztahu:

$$m = 2s + 1, \quad (2.1)$$

kde m je počet úrovní výstupního fázového napětí a s je počet nezávislých napěťových zdrojů.

Přidáním dalších můstků do kaskády lze dle (rov. 2.1) vytvořit m -hladinový měnič. Příklad pětiúrovňového střídače ukazuje obr. 2.3.



Obr. 2.3 Pětihladinový kaskádní střídač

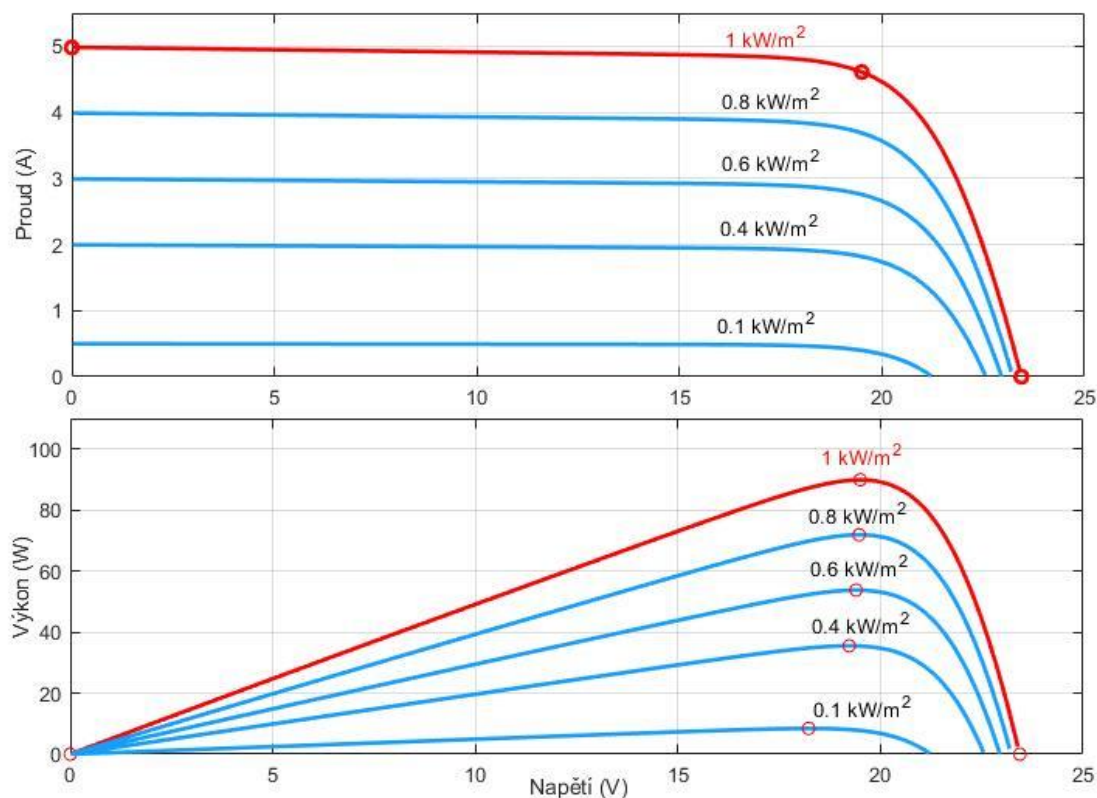
Tabulka 2.2 opět ukazuje výstupní napětí u v závislosti na spínacích kombinacích. Za předpokladu, že se vstupní napětí rovnají, se tabulka značně zjednoduší. V případě vícehladinového měniče s připojenými fotovoltaickými panely lze však předpokládat různé hladiny napětí na stejnosměrné straně jednotlivých můstků. Výstupní napětí ukazuje obr. 2.8 v podkapitole o pulsně šířkové modulaci.

Tabulka 2.2 Spínací tabulka pětiúrovňového střídače

u	S₂+S₃	S₁+S₄	S₁+S₂	S₃+S₄
S₆+S₇	$-U_{dc1}-U_{dc2}$	$U_{dc1}-U_{dc2}$	$-U_{dc2}$	$-U_{dc2}$
S₅+S₈	0	$U_{dc1}+U_{dc2}$	U_{dc2}	U_{dc2}
S₅+S₆	$-U_{dc1}$	U_{dc1}	0	0
S₇+S₈	$-U_{dc1}$	U_{dc1}	0	0

2.3 Charakteristiky fotovoltaického panelu

Fotovoltaický panel je polovodičový modul se sério-paralelně zapojenými články s fotocitlivým PN přechodem na bázi křemíku. Cílem práce není podrobně popisovat materiálovou strukturu jednotlivých částí fotovoltaické elektrárny, ale pro regulaci je důležité uvést dynamické parametry. Výsledný výkon na svorkách panelu je závislý na intenzitě slunečního záření a teplotě okolního prostředí. Tyto závislosti nevykazují lineární průběh.



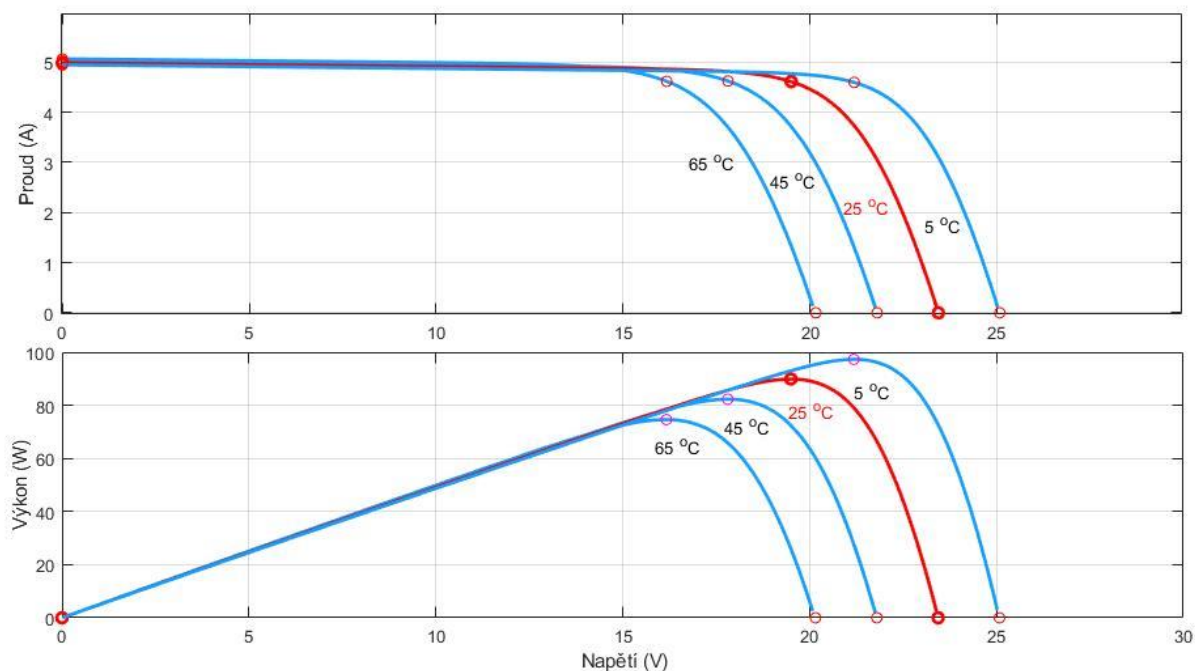
Obr. 2.4 Charakteristiky proudu a výkonu solárního panelu v závislosti na napětí a osvětlení panelu (Matlab/Simulink)

Charakteristiky uvedené na obr. 2.4 přibližně odpovídají polykrystalickému solárnímu panelu BlueSolar 90 W, který je využitý v praktické části práce. K vytvoření těchto a dalších charakteristik posloužil blok programu Matlab Simulink z knihovny Simscape, Solar. Tento blok umožňuje zadání vlastních mezních hodnot solárního panelu, jako je napětí naprázdno, zkratový proud apod. Charakteristiky jsou v programu Matlab dopočítávány pomocí matematického modelu:

$$I_0 = n_p I_{ph} - n_p I_{rs} \left(e^{K_0 \frac{U}{n_s}} - 1 \right), \quad (2.2)$$

kde I_0 znamená výstupní proud panelu, U výstupní napětí, I_{ph} proud úměrný osvětlení, I_{rs} reverzní saturační proud článku (teplotní faktor), K_0 je konstanta, n_p a n_s počet sériově a paralelně zapojených článků.[8]

Na obr. 2.5 vidíme charakteristiky proudu a výkonu v závislosti na napětí a okolní teplotě, kde pro každou charakteristiku je nastavena odlišná okolní teplota.

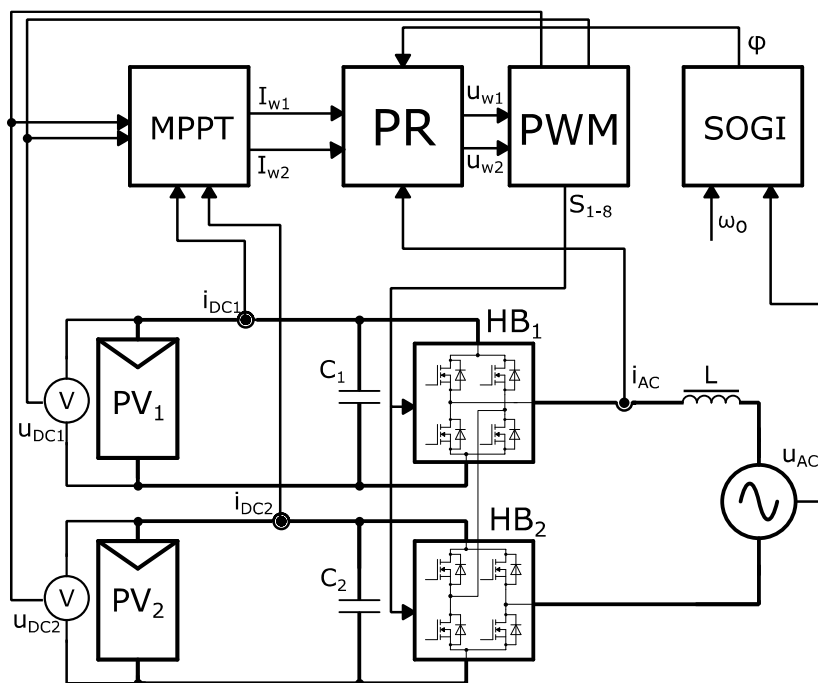


Obr. 2.5 Charakteristiky proudu a výkonu solárního panelu v závislosti na napětí a okolní teplotě (Matlab/Simulink)

Charakteristiky ukazují, že zvyšování teploty má negativní vliv na výkon FV panelu. Z průběhů lze také vyčíst, že při změně okolní teploty se tvar charakteristik příliš nemění. Rozdílné jsou zejména maximální hodnoty. Uvedené charakteristiky poukazují na zásadní závislost výkonu panelu nejen na okolních vlivech, ale i na výstupním napětí. Proto je za účelem maximálního vytěžení fotovoltaického panelu nutné do systému přidat tzv. regulátor MPPT (Maximum Power Point Tracking) [8], který je popsán v další kapitole.

2.4 Algoritmy řízení

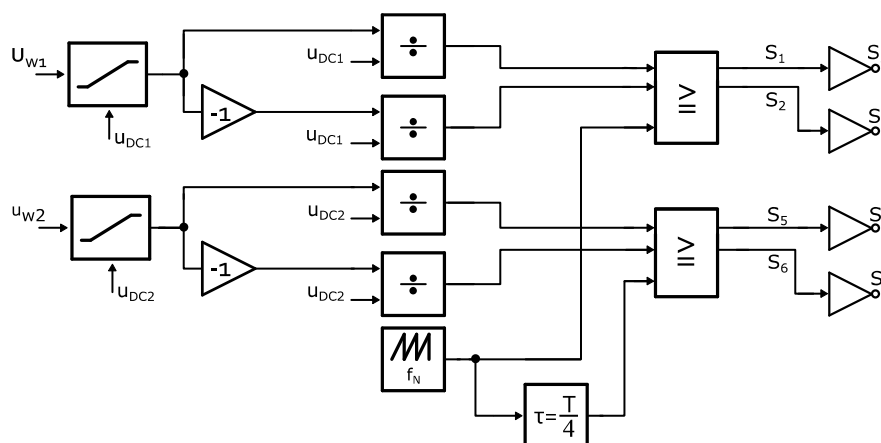
Na obr. 2.6 je uveden blokový diagram algoritmů řízení vícehladinového kaskádního měniče připojeného k síti.



Obr. 2.6 Blokový diagram měniče s řídicími bloky

Výkonový systém tvoří kaskádní spojení dvou jednofázových napěťových střídačů v můstkovém zapojení, kdy každý z můstků je na své stejnosměrné straně napájen z vlastního fotovoltaického panelu. Výstup kaskádního měniče je připojen k jednofázové elektrické síti. Řídicí bloky dostávají informaci o napětí a proudu na stejnosměrné straně každého z můstků. Zároveň je snímán výstupní proud a průběh napětí sítě. MPPT na základě stejnosměrného napětí a proudu, tj. výkonu FV panelů, vyhodnotí amplitudu proudu sítě. Na základě této amplitudy je vygenerována harmonická křivka požadovaného proudu sítě a předána proporčně rezonančnímu regulátoru (PR), který řídí velikost požadovaného napětí na výstupu kaskádního měniče tak, aby výstupní proud dodávaného do sítě odpovídal požadavku. Blok pulsně šířkové modulace PWM na základě požadovaného napětí řídí měniče s příslušnou hloubkou modulace. Blok SOGI (Second Order Generalized Integrator) je dvojitý integrátor s rezonanční frekvencí odpovídající frekvenci sítě 50 Hz. Blok SOGI zajišťuje synchronizaci řízení s napětím sítě a poskytuje odhad fázového úhlu φ .

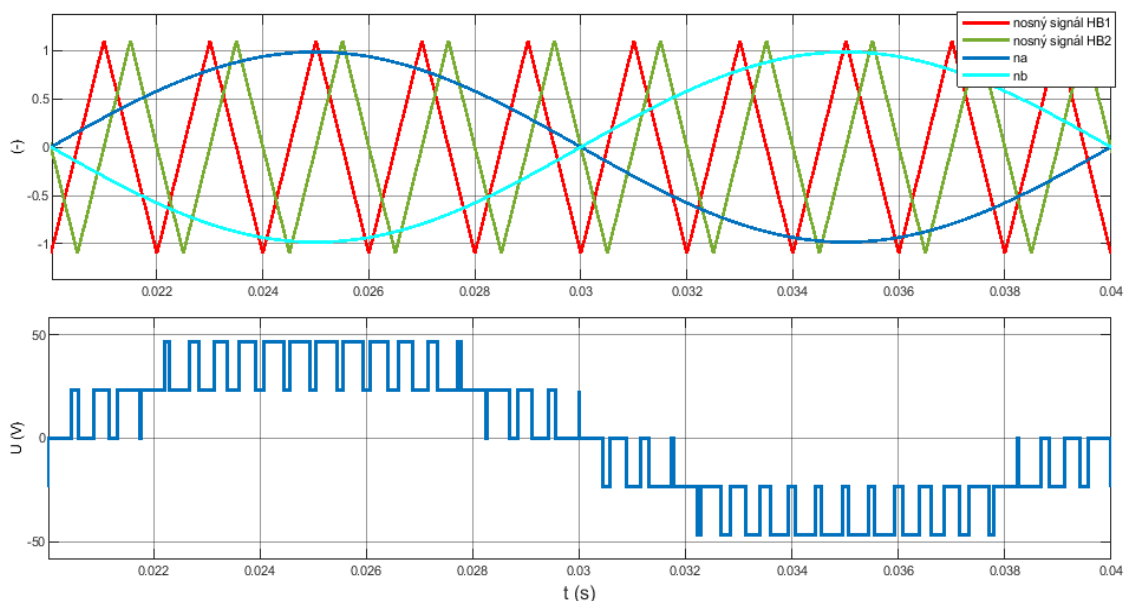
2.4.1 Pulsně šířková modulace (PWM)



Obr. 2.7 Blokový diagram PWM pro spínání pěti hladinového měniče

Pro řízení kaskádního měniče se dvěma H-můstkami je využita PWM se dvěma pilovými signály vzájemně posunutými o 90 stupňů. Každý půlmůstek je řízen jedním modulačním signálem harmonického průběhu. Modulační signály stejného střídače jsou vzájemně v protifázi pro dosažení maximálního výstupního napětí.

Na obr. 2.8 je vidět PWM modulace pro použitý pěti hladinový měnič.



Obr. 2.8 Vstupní signály PWM (nahore) a výstupní napětí střídače naprázdno (dole) pro pěti hladinový měnič

Pro větší názornost je frekvence nosných pilových signálů snížena na 500 Hz, frekvence řídicích signálů pak odpovídá frekvenci sítě 50 Hz. Při zvyšování počtu H-můstků v kaskádě je nutné přidat pilové signály a upravit jejich vzájemný posun. Pro kaskádu složenou ze dvou H-můstků je vzájemný posun čtvrtina periody [6].

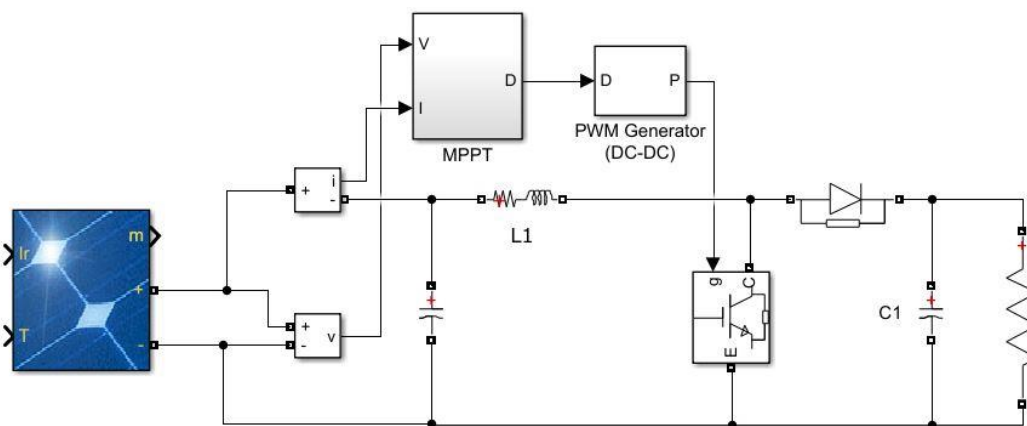
2.4.2 Algoritmy MPPT

Algoritmy MPPT [8] jsou využívány ve fotovoltaických systémech pro schopnost dodání nejvyššího možného výkonu fotovoltaického pole za daných podmínek.

Jako MPPT regulátor se obvykle označuje systém, který obsahuje řídicí jednotku s tzv. MPPT algoritmem a DC-DC měničem. Tento algoritmus zajišťuje maximální vytěžování FV panelu a zároveň zaručuje, že nedojde k poklesu napětí do zkratu.

Charakteristiky FV panelu, ze kterých vychází algoritmy MPPT, jsou uvedeny na obr. 2.4. Hlavním úkolem regulátoru je řídit velikost proudu FV panelu tak, aby se pracovní bod panelu držel na vrcholu výkonové křivky, tj. v bodě, kde platí $\frac{dP}{dU} = 0$. V běžných systémech FVE se proud FV panelu řídí DC-DC měničem.

MPPT algoritmů je více druhů a v některých bodech se liší. Principiálně je na začátku změřeno a uloženo aktuální napětí a proud FV panelu. Následně je dopočítán přírůstek těchto veličin oproti minulé uložené hodnotě, a tedy i přírůstek celkového výkonu systému. Poté probíhá sada komparací, kde výsledkem je změna střídy D o předem určený, nebo vypočtený přírůstek. Jednoduše je přírůstek kladný, pokud se výkon systému pohybuje na PV křivce od vrcholu doprava anebo naopak. Lze říci, že logika v principu implementuje integrační regulátor s tím, že je použito odlišné integrační zesílení pro oblast napravo a nalevo od bodu maximálního výkonu. Jako příklad jsou uvedeny dva různé algoritmy [8][9].

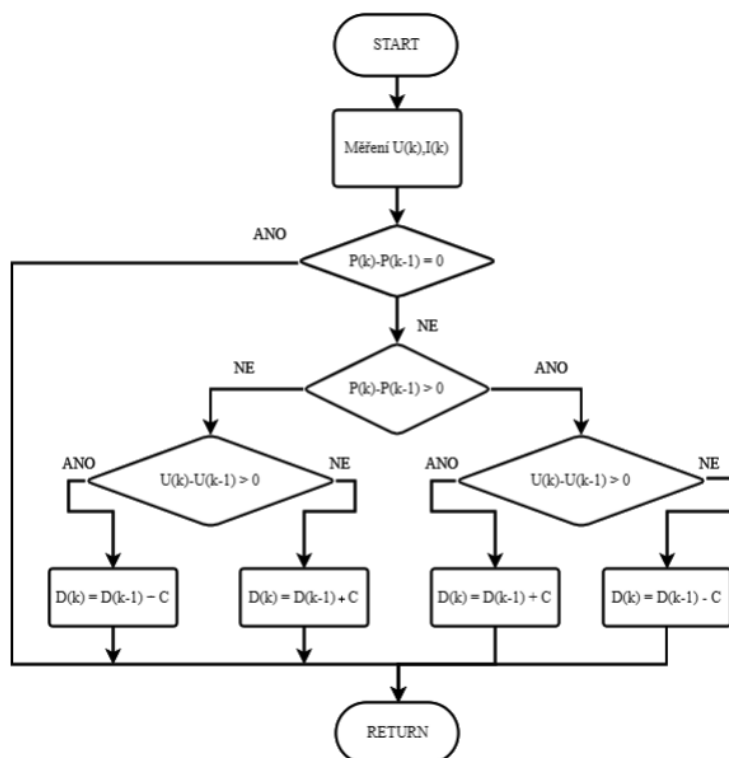


Obr. 2.9 Obvyklé zapojení MPPT regulátoru s DC-DC konvertorem (DC zátěž, Matlab Simulink) [9]

Metoda Perturb and Observe (P&O)

P&O algoritmus je velmi častou MPPT metodou, právě díky její jednoduchosti [8]. Název odpovídá funkci a v překladu by se přeložil jako „odchýlení a vyhodnocení.“ Algoritmus (viz vývojový diagram obr. 2.10) vyhodnocuje diferenci, neboli rozdíl aktuálního výkonu FV panelu vůči poslední naměřené hodnotě. Další hodnocenou veličinou je změna napětí. Výstupní akční veličinou je střída DC-DC měniče D , která je přímo úměrná velikosti napětí na výstupu DC-DC měniče. Na základě polarity těchto hodnot je střída D zvýšena, nebo snížena o hodnotu konstanty C . Polarita hodnocených veličin určuje bod, kde se nachází aktuální pracovní bod FV panelu, viz charakteristiky na obr. 2.4.

Nevýhodou tohoto algoritmu je tendence k nepřetržité oscilaci kolem MPP. Tato vlastnost se dá ovlivnit například nastavením nelineárního kroku vzhledem k přiblížení k maximu charakteristiky, nebo vhodnou filtrací měřených veličin [8].



Obr. 2.10 Vývojový diagram P&O algoritmu (D je střída DC-DC měniče) [8]

Metoda Incremental Conductance (INC MPPT)

Metoda Incremental Conductance [9], neboli metoda přírůstkové vodivosti, opět pracuje s faktem, že derivace P-U charakteristiky článku je v bodě MPP nulová. Vlevo od MPP je větší než nula a vpravo je záporná. V tomto se princip INC metody od P&O algoritmu neliší:

$$\frac{dP}{dU} = 0 \text{ pro MPP}, \quad (2.3)$$

$$\frac{dP}{dU} < 0 \text{ napravo od MPP}, \quad (2.4)$$

$$\frac{dP}{dU} > 0 \text{ nalevo od MPP}. \quad (2.5)$$

Dále platí odvození:

$$\frac{dP}{dU} = \frac{d(U \cdot I)}{dU} = I + U \frac{dI}{dU} \quad (2.6)$$

Odtud vychází vodivost figurující v názvu algoritmu. Ve výsledku je porovnáván přírůstek vodivosti s celkovou vodivostí:

$$\frac{dI}{dU} = -\frac{I}{U} \text{ pro MPP}, \quad (2.7)$$

$$\frac{dI}{dU} < -\frac{I}{U} \text{ napravo MPP}, \quad (2.8)$$

$$\frac{dI}{dU} > -\frac{I}{U} \text{ nalevo MPP}. \quad (2.9)$$

Princip algoritmu odpovídá předešlé metodě, ale základní rozhodování nevychází z přírůstku výkonu, nýbrž z porovnání vodivosti a její derivace. Opět existuje více variant, jak získat rychlejší a přesnější chování takového algoritmu. Jedním příkladem by byl INC algoritmus s variabilním krokem regulace [14]. Tento algoritmus využívá derivace výkonu v čase k určení velikosti kroku. Ve své podstatě jde o integrační regulátor s požadovanou hodnotou $\frac{dP}{dU} = 0$.

$$C = N \cdot \left| \frac{dP}{dU} \right| \quad (2.10)$$

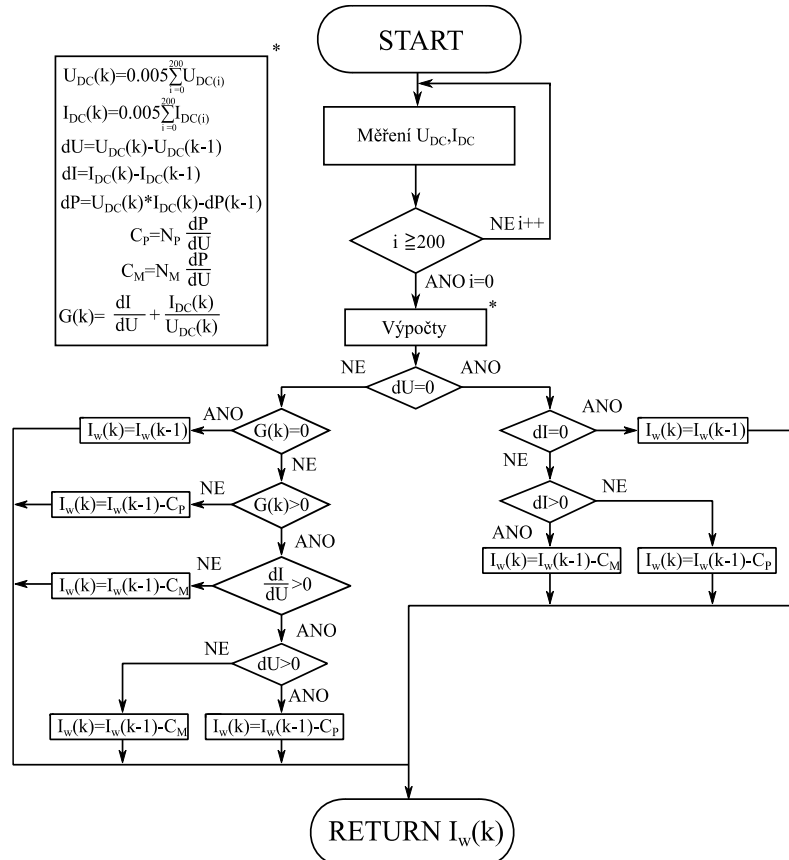
Finální MPPT algoritmus

V navrhovaném prototypu je využitý INC MPPT s variabilním krokem, který je s drobnými úpravami založený na algoritmu se zvýšenou stabilitou [14]. Takto navržený algoritmus vykazuje vyšší stabilitu celého systému a lepší schopnost reagovat na rychlé změny intenzity osvětlení.

Na obr. 2.11 je vývojový diagram algoritmu, kde jsou stejnosměrné veličiny na straně panelů filtrovány, za účelem vyšší stability. Číselný filtr provádí průměr z hodnot naměřených v jedné periodě síťového kmitočtu.

V dalším bloku se vypočítají derivace napětí, proudu a výkonu FV panelu. Důležitým prvkem jsou konstanty N_P a N_M , kde každá určuje zesílení přírůstku v odlišném pracovním bodě. Z odlišné strmosti charakteristiky, viz obr. 2.4, je nutné vyvodit různou velikost zesílení pro aktuální pozici na charakteristice vůči MPP. Celkový přírůstek C poté odpovídá podílu derivací výkonu a napětí.

Sada podmínek v diagramu určuje, zda se má velikost akční veličiny měnit, a pokud ano, tak jakým směrem. Výstupem je požadavek na velikost proudu I_w příslušného prvku kaskády. Polarita přírůstku je určena automaticky výpočtem C . Polarita je však inverzní, podíl derivace výkonu a napětí vychází záporný, pokud má být požadavek zvýšen a naopak.



Obr. 2.11 Vývojový diagram finálního MPPT algoritmu [14]

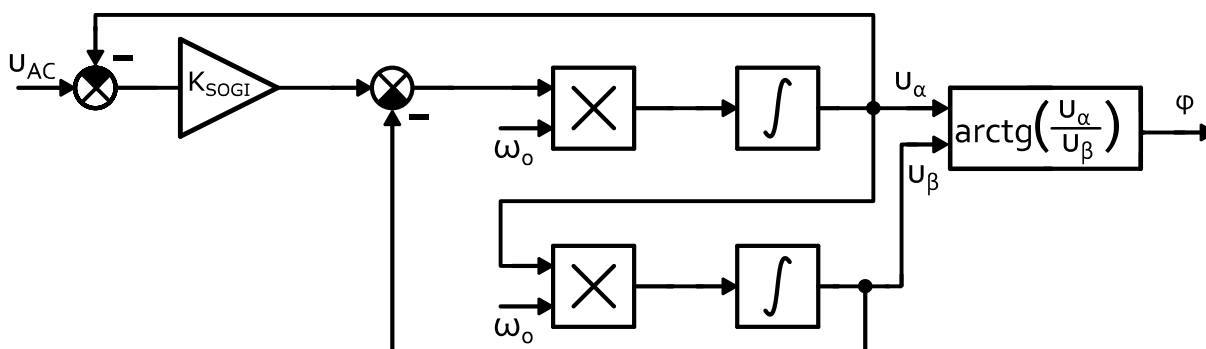
2.4.3 Synchronizace s napětím sítě

Klíčovým prvkem řídicích algoritmů měničů připojených k síti je synchronizace s napětím sítě.

Jednou z metod je SOGI [10], algoritmus využívající dvojitou integraci vstupního průběhu. Napětí v síti může být zkreslené následkem rušení či harmonickými složkami. Algoritmus SOGI pro synchronizaci se sítí se chová jako selektivní pásmová propust naladěná na frekvenci sítě 50 Hz; výstupem dvojitě integrace je první harmonická napětí sítě.

Obvykle je tento algoritmus spojován s fázovým závěsem, vzniklé spojení se nazývá SOGI-PLL. Fázový závěs předává vypočítanou frekvenci SOGI, a tak je celá smyčka frekvenčně adaptivní. Pro navržené algoritmy řízení v této práci je předpokládána konstantní frekvence sítě a algoritmus adaptace na variabilní frekvenci je vynechán.

Veličina U_{AC} na obr. 2.12 reprezentuje měřené napětí sítě, ω_0 značí definovanou úhlovou frekvenci sítě ($2\pi 50$). Veličiny U_α a U_β představují složky vektoru napětí sítě rotujícího ve stojícím souřadném systému α - β .



Obr. 2.12 Blokový diagram algoritmu SOGI pro synchronizaci s napětím sítě

Laplaceův obraz přenosu systému na obr. 2.12 a odvození stavové rovnice níže:

$$F_{1(p)} = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{k_{SOGI}p}{p^2 + \omega_0^2}, \quad (2.11)$$

$$Y(p) = X(p) \frac{k_{SOGI}p}{p^2 + \omega_0^2}, \quad (2.12)$$

$$Y(p)(p^2 + \omega_0^2) = X(p)k_{SOGI}p \quad /: p^2, \quad (2.13)$$

$$Y(p) + Y(p) \frac{\omega_0^2}{p^2} = X(p) \frac{k_{SOGI}}{p}, \quad (2.14)$$

$$y = \int (k_{SOGI}x - \int y \omega_0^2 dt) dt, \quad (2.15)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{dy}{dt} \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\omega_0^2 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \int y dt \\ y \end{bmatrix} + k_{SOGI} \begin{bmatrix} x \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (2.16)$$

Následuje vyjádření složek napěťového vektoru v stojícím souřadném systému harmonickými funkcemi a vyjádření jejich derivací:

$$u_\alpha = \cos \omega_0 t, \quad (2.17)$$

$$u_\beta = \sin \omega_0 t,$$

$$u_\alpha = \frac{1}{\omega_0} \frac{du_\beta}{dt} \Rightarrow \frac{du_\beta}{dt} = u_\alpha \omega_0,$$

$$\frac{du_\alpha}{dt} = -\omega_0 u_\beta. \quad (2.18)$$

Dosazením do (2.16) dostáváme stavový tvar:

$$\begin{bmatrix} \frac{du_\alpha}{dt} \\ \frac{du_\beta}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_0 \\ \omega_0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} + k_{SOGI} \begin{bmatrix} x \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (2.19)$$

V tomto případě je x rozdíl $x = u_{AC} - u_\alpha$, kde u_{AC} je okamžitá hodnota napětí sítě a u_α je okamžitá hodnota první harmonické [10]. Výstupem algoritmu je fázový úhel:

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{u_\beta}{u_\alpha}. \quad (2.20)$$

2.4.4 Proporcionálně rezonanční regulátor

Proporcionálně rezonanční (PR) regulátor je frekventovaně užívaným regulátorem harmonických signálů ve stojícím souřadném systému [12].

Proporční regulátor představuje pouze odchylku naměřeného proudu tekoucího do sítě i_{AC} od požadovaného proudu i_w zesílenou konstantou regulátoru K_p . Napětí na výstupu P-regulátoru odpovídá rovnici:

$$u_p = K_p e, \text{ kde } e = i_w - i_{AC}. \quad (2.21)$$

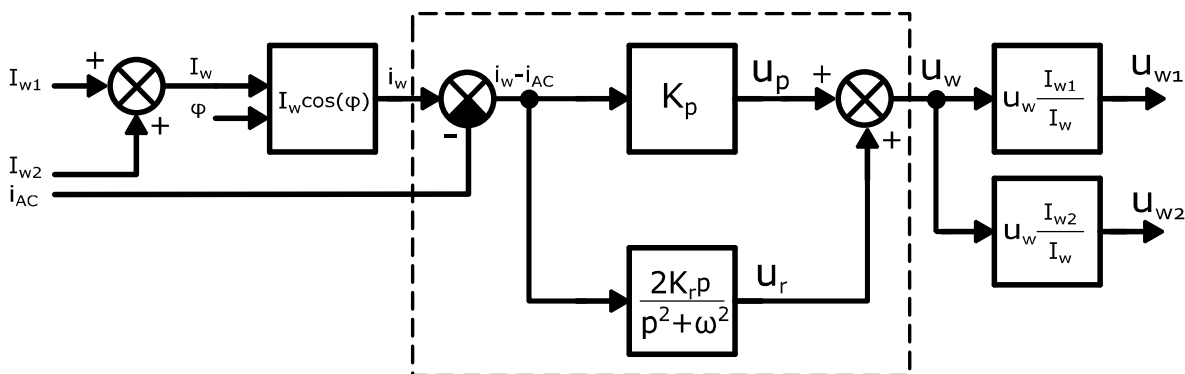
Rezonanční regulátor je dvojitý integrátor a chová se jako pásmová propust s laděnou rezonanční frekvencí, v tomto případě na frekvenci sítě 50 Hz. Přenos regulátoru je daný vztahem:

$$F_p = \frac{2K_r p}{p^2 + \omega^2}, \quad (2.22)$$

kde K_r je zesílení rezonančního regulátoru a p je Laplaceův operátor. Vstupní veličinou je tedy odchylka a výstupem je součet přenosů obou regulátorů [12].

2.4.5 Finální algoritmus řízení

Hlavní část řídicího algoritmu navrhovaného řešení je blokově ilustrována na obr. 2.13. Jádrem řízení PR regulátor (čárkováně) na vstupu získává průběh požadovaného proudu sítě i_w . Amplituda I_w je součtem příspěvků od MPPT regulátorů (I_{w1} a I_{w2}) a fázový úhel je předán od SOGI algoritmu. Velikost jednotlivých proudů odpovídá aktuálnímu výkonu konkrétního panelu. Vstupem do regulátoru je nakonec průběh proudu i_w , který je generován na základě fázového úhlu předaného od algoritmu SOGI. Proud i_w je porovnáván s měřeným proudem sítě i_{AC} . Výstup PR regulátoru, průběh výstupního napětí u_w , je rozdělen v poměru $\frac{I_{wn}}{I_w}$ a předán korespondujícímu PWM regulátoru.



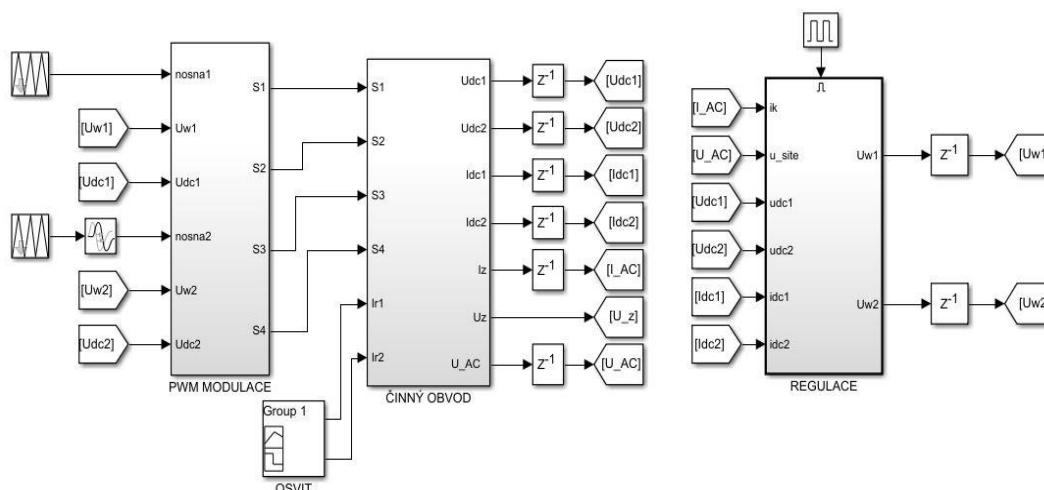
Obr. 2.13 Finální algoritmus řízení kaskádního měniče se dvěma H-můstky

3 Matematický model

Veškeré simulační modely jsou vytvořeny za pomoci programu Matlab/Simulink a knihovny PLECS, která funguje jako prostředí pro simulaci elektrických obvodů. Simulace fotovoltaických panelů je realizována pomocí Simscape/Electrical.

Simulace je složena ze tří hlavních bloků, vnitřní funkce a parametry jsou vždy přizpůsobeny modelované situaci:

- pulzně šířková modulace (PWM) k řízení spínacích prvků,
- obvod výkonové části včetně zdrojů a zátěže (sítě),
- funkční blok obsahující všechny dříve zmíněné algoritmy.



Obr. 3.1 Bloky matematického modelu sestaveného v programu Matlab/Simulink

Blok PWM modulace obsahuje dva subsystémy, kde každá modulace dostává odlišný řídicí signál v závislosti na výkonu příslušného FV panelu, nebo dle nastavené velikosti proudu v případě simulace se zdroji konstantního napětí.

Blok činný obvod obsahuje zapojení kaskádního měniče obr. 2.3 a zdroje energie dle aktuálního scénáře situace.

Blok regulace zahrnuje všechny řídicí algoritmy kromě zmíněné PWM regulace.

3.1 Kaskádní měnič (5-CHB) se dvěma H-můstky

3.1.1 Parametry simulace se zdroji konstantního napětí

V tomto případě jsou napěťové zdroje nastavené na stejnou amplitudu stejnosměrného napětí. Nosné jsou zde totožné pilové průběhy, pouze fázově posunuté o čtvrtinu periody.

Blok výkonového obvodu obsahuje zapojení střídače, viz obr. 2.6, s tím rozdílem, že FV panely jsou nahrazeny zdroji konstantního napětí a z regulace je vynechán MPPT. Jedná se o kaskádní měnič se dvěma H-můstky pro generaci pětiúrovňového výstupního napětí (5-CHB), kde výstupní svorky měniče jsou připojeny k jednofázové síti. V sérii s jednofázovou sítí je zapojena filtrační indukčnost L_Z a odpor sítě reprezentuje rezistor R_Z . Samotnou jednofázovou síť zde nahrazuje zdroj harmonického signálu o frekvenci sítě f_{AC} , viz tabulka 3.1.

Blok regulace implementuje regulační algoritmy zmíněné v kap.2.4. MPPT algoritmus je v tomto případě vynechán a požadavek na velikost proudu obou můstků je zadán konstantou.

V tabulce 3.1 jsou uvedené parametry součástek a dalších simulačních veličin.

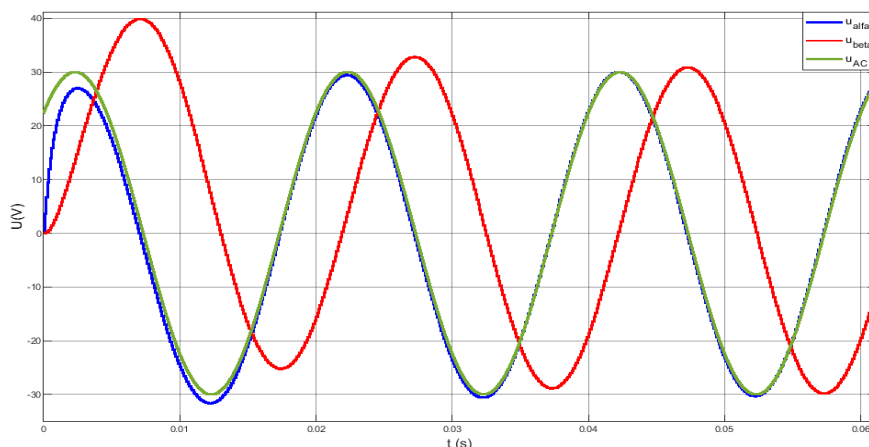
Tabulka 3.1 Parametry simulace pro 5-CHB s napěťovými zdroji

Parametry		Konstanty PR regulátoru	
Krok simulace	1,00E-06	Rezonanční K_R	900
Amplituda napětí sítě U_{AC}	30 V	Proporční K_P	10
Frekvence sítě f_{AC}	50 Hz	Konstanta SOGI regulátoru	
Fázový posuv φ_{AC}	60°	K_{SOGI}	5 ω
Odpor zátěže R_Z	0,5 Ω		
Indukčnost filtrační cívky L_Z	2,5 mH		
Napětí zdrojů U_{DC1}, U_{DC2}	20 V		
Frekvence nosné $f_{nosné}$	10 kHz		

3.1.2 Výsledky simulace se zdroji konstantního napětí

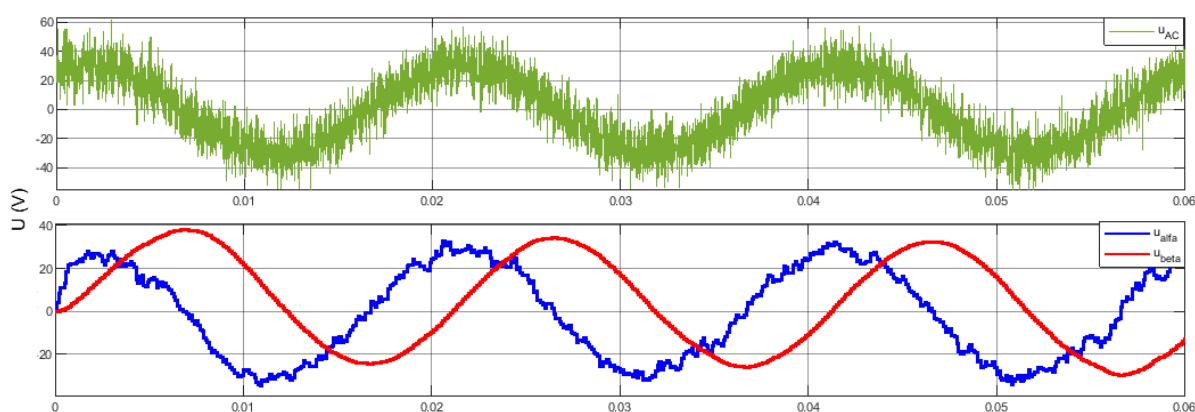
Synchronizace se sítí

V úvodu byla zmíněna důležitost shodné fáze napětí střídače a napětí sítě. Pro tento účel je tedy využit algoritmus SOGI. Obr. 3.2 ukazuje zavěšování výstupu u_{α} na napětí sítě. V čase nula jsou obě složky stojícího systému nulové a po přibližně jedné periodě je napětí synchronizované.



Obr. 3.2 Synchronizace se sítí pomocí SOGI: Zavěšování výstupu u_{α} na napětí sítě při spuštění programu (napětí sítě s nulovým zkreslením)

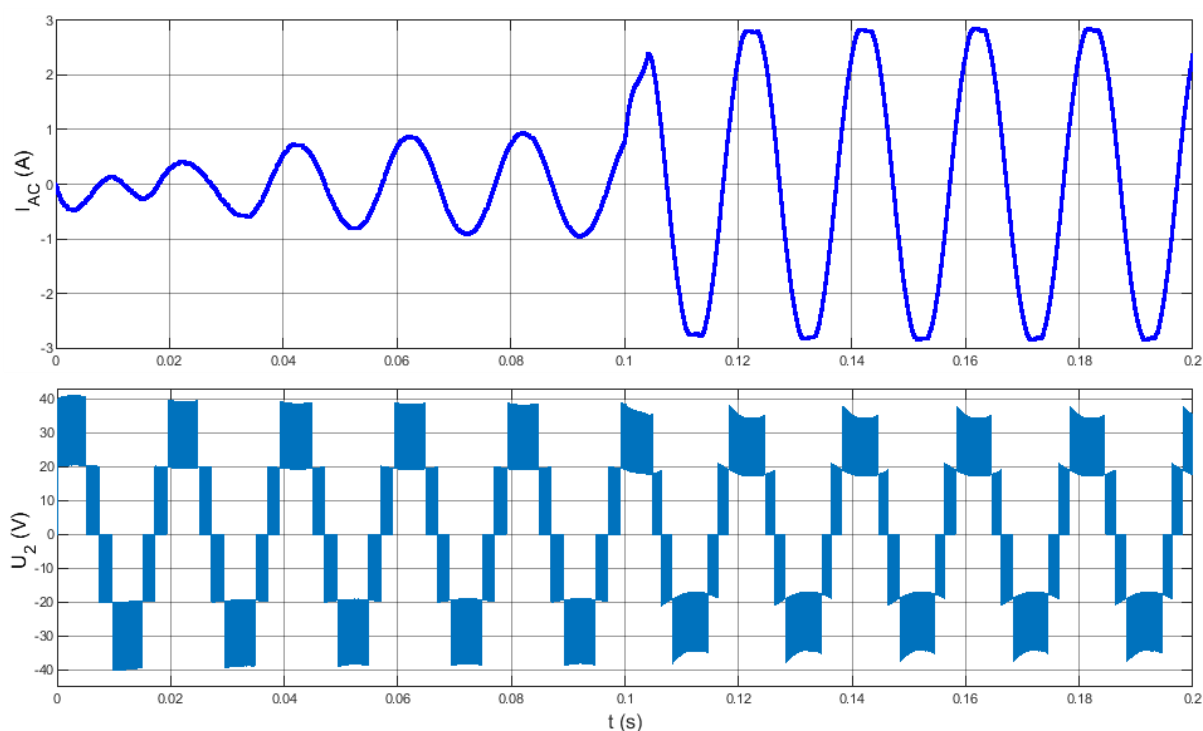
Obr. 3.3 ukazuje odolnost algoritmu SOGI proti rušení snímaného signálu. V prvním poli je průběh napětí simulované sítě se zkreslením převyšujícím 10%. Na průběhu napětí u_{α} je zde toto zkreslení znatelné, ale zásadně snižené.



Obr. 3.3 Synchronizace se sítí pomocí SOGI: Zavěšování výstupu u_{α} na napětí sítě při spuštění simulace (napětí sítě zkresleno více než 10%)

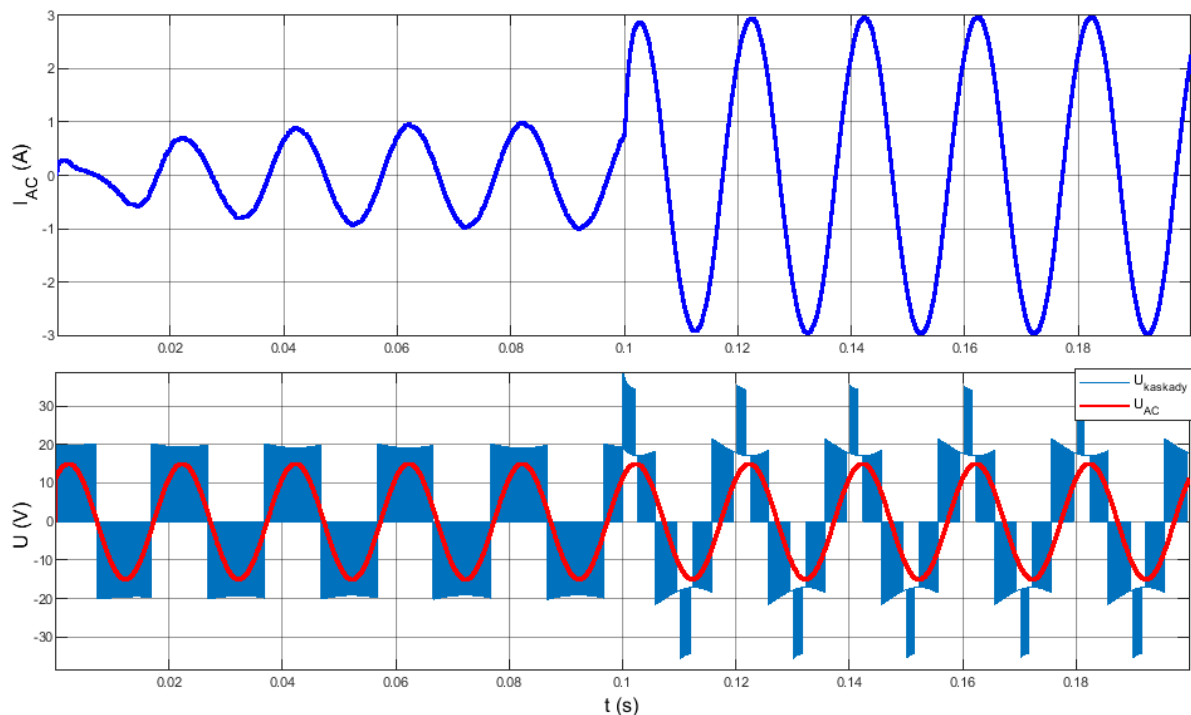
Výstupní průběhy – ověření funkce PR regulátoru

Regulace výstupního proudu je realizována pomocí PR regulátoru dle regulační smyčky uvedené na obr. 2.13. Součet napětí FV panelů musí být dostatečně větší, než napětí sítě, aby byl systém říditelný. Pokud by dostatečný rozdíl potenciálu nebyl splněn, dojde k omezení řídicího signálu v PWM regulátoru, i když dostupný výkon na stejnosměrné bude vysoký. Na obr. 3.4 jsou zobrazeny výstupní napětí kaskády a proud tekoucí do sítě. K ustálení na požadované hodnotě proudu dochází po necelých pěti periodách síťového kmitočtu. V čase 100 ms dochází ke změně požadavku amplitudy proudu na 3 A. Velikost řídicího signálu je omezena uvnitř bloku PWM regulátoru na maximum, to je dané velikostí napětí na stejnosměrné straně.



Obr. 3.4 Výsledky simulací: Rozběh 5-CHB střídače s napěťovými zdroji na SS straně – systém připojený k 1-fázové síti

Dalším případem nežádoucího stavu je případ nízké hloubky modulace, kde součet napětí stejnosměrné strany kaskády je natolik vysoký a požadavek na výstupní proud nízký, že výsledný průběh napětí kaskády není vícehladinový. Pro případ simulace i experimentu je tedy třeba uvažovat velikost napětí sítě jako nezanedbatelný parametr.



Obr. 3.5 Rozběh 5-CHB střídače s napěťovými zdroji na SS straně (změna U_{AC})

Průběh na obr. 3.5 ukazuje stav nízké hloubky modulace pro požadavek na velikost výstupního proudu 1 A. V čase 100 ms je opět zvýšen požadavek na 3 A, kde požadované napětí kaskády přesáhlo stejnosměrné napětí jednoho můstku. Napětí sítě bylo pro simulaci tohoto stavu sníženo z 30 V na 15 V v amplitudě. Výstupní napětí by s ohledem na zkruslení mělo být vícehladinové i při nízkém požadavku na výstupní proud.

3.1.3 Parametry simulace s fotovoltaickými panely

Tabulka 3.2 Parametry pro 5-CHB s fotovoltaickými panely

Parametry simulace		Konstanty PR regulátoru	
krok simulace	1,00E-06	K_R	900
U_{AC} (ampl)	20 V	K_P	10
f_{AC}	50 Hz	Konstanta SOGI regulátoru	
φ_{AC}	37°	K_{SOGI}	5 ω
R_Z	0,5 Ω	Konstanty MPPT regulátoru	
L_Z	2,5 mH	N_P	0,002
$f_{nosné}$	10 kHz	N_M	0,02
C_{DC}	10 mF		

Tabulka 3.3 Parametry použitého panelu

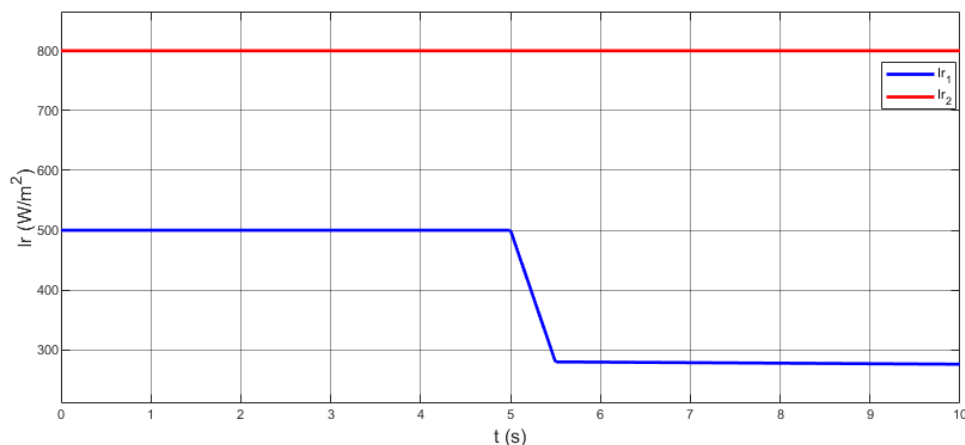
Maximální výkon	90 W
Napětí naprázdno	23,44 V
Napětí při MPP	19,5 V
Teplotní koeficient U	-0,35 %/°C
Článků v panelu	36
Proud nakrátko	4,98 A
Proud při MPP	4,61 A
Teplotní koeficient I	0,04 %/°C

Pro simulaci fotovoltaického panelu v prostředí Simulink byl využit blok „PV array“, který umožňuje vybrat konkrétní panel s jeho parametry změřenými výrobcem. Panel použitý pro laboratorní prototyp v databázi není, ale Simulink umožňuje vložit důležité parametry získané od výrobce a simulovat uživatelem definovaný fotovoltaický systém. Jde o polykrystalický panel BlueSolar Polycrystalline Panels 90 W.

N_P a N_M jsou konstanty MPPT regulátoru, kde N_P určuje zesílení pro pravou stranu charakteristiky (obr. 2.4) a N_M naopak pro levou stranu této charakteristiky. Volt-ampérové charakteristiky uvedené na obr. 2.4 ukazují, že strmost změny výkonu v závislosti na napětí je nižší nalevo od MPP. Z tohoto důvodu je zesílení pro snižování požadavku vyšší, než pro změnu požadavku směrem nahoru.

Výsledky simulace s užitím fotovoltaických panelů jako zdrojem napětí jsou zaměřeny na funkčnost MPPT, vlastnosti ostatních regulátorů nejsou odlišné od výsledků předešlé kapitoly. Hlavním zkoumaným stavem je reakce na změnu osvětlení.

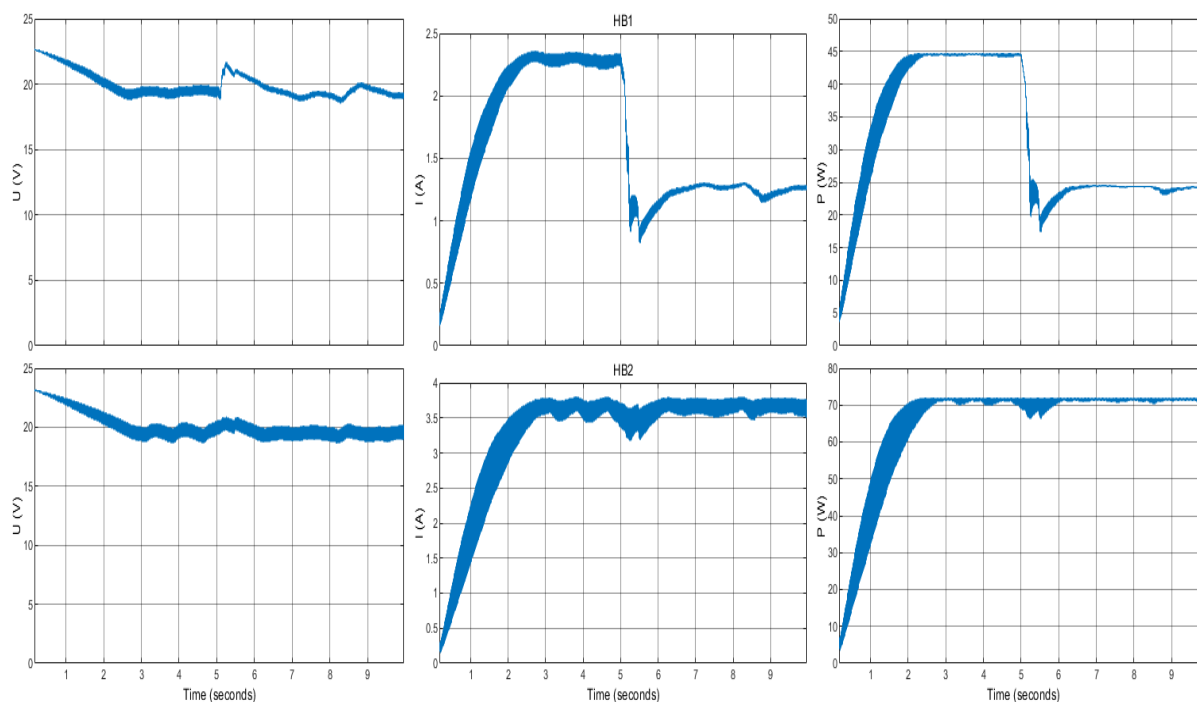
Dříve zmíněný blok „PV array“ v prostředí Simulink umožňuje zadávat velikost osvětlení a případně teploty. Pro otestování reakce systému je v simulaci přiveden na jednotlivé panely průběh intenzity osvětlení uvedený na obr. 3.6.



Obr. 3.6 Průběh intenzity osvětlení dopadající na konkrétní fotovoltaický panel v čase

Změny osvětlení mají ukazovat dynamické vlastnosti systému, tedy primárně MPPT regulátoru. První panel je osvětlený polovičním měrným výkonem, než ze kterého vychází jeho MPP. Zde sice dochází ke změnám osvětlení, ale pro účely simulace je zadána hodnota výkonové hustoty slunečního záření. Pokles výkonové hustoty slunečního záření je zde konkrétně $640 \text{ W/m}^2\text{s}$. Dle výsledků analýzy stínů způsobených mraky [13], by tato zvolená strmost vždy nestačila, změny mohou dosahovat strmosti až $3000 \text{ W/m}^2\text{s}$. Pro účely zkoumání a prezentace výsledků simulace byla zvolena nižší strmost, která odpovídá přibližně průměrné hodnotě. Na dynamické chování filtru má vliv číslicový filtr zmíněný v kap.2.4.2. MPPT regulátor reaguje na změny s dopravním zpožděním 20 ms. Ve chvíli, kdy změna osvětlení je příliš strmá a MPPT nemá dostatek času zareagovat snížením požadavku na velikost výstupního proudu, může být systém nestabilní.

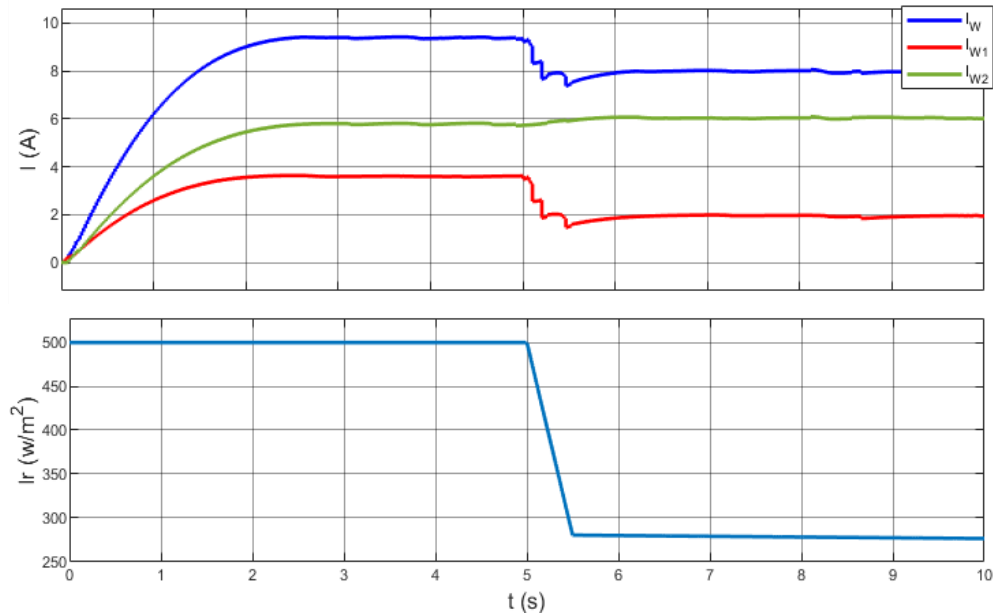
3.1.4 Výsledky simulace s fotovoltaickými panely – kaskádní měnič



Obr. 3.7 Průběh napětí, proudu a výkonu panelů v reakci na průběh osvitů z Obr. 3.6 (2 můstky)

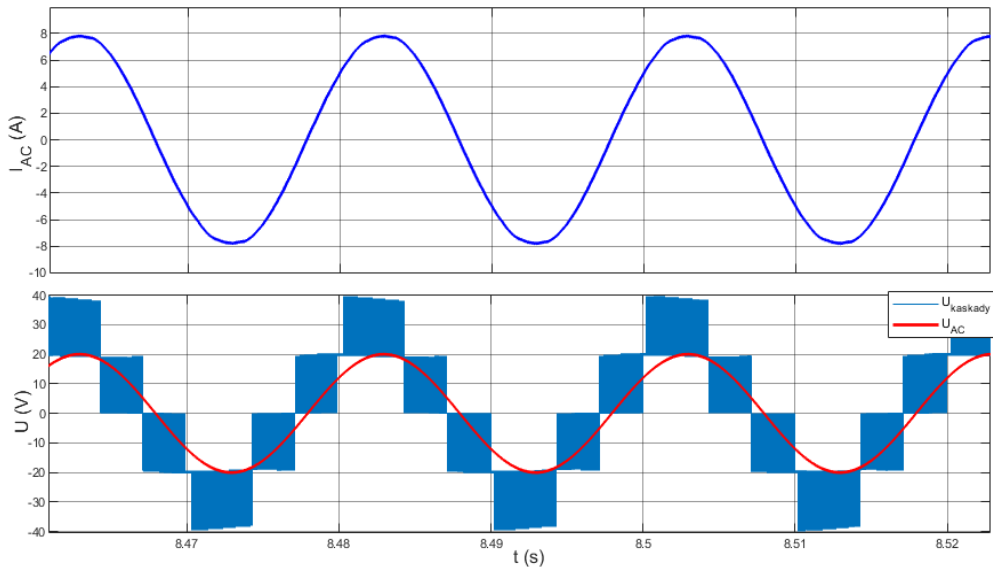
Na základě získaných výsledků lze konstatovat, že systém v reakci na osvit jednoho panelu reaguje nezávisle na světelných podmínkách druhého. Charakteristiky vlevo na obr. 3.7 ukazují změny napětí v čase. Velikost napětí se po ustálení v MPP drží v úzkém rozmezí a jeho ustálená hodnota je pro různý výkon panelu stejná. Podobná velikost stejnosměrného napětí na prvcích kaskády je příznivá pro provoz střídače. Charakteristiky také ukazují, že hlavní vliv na velikost výkonu má proud.

Odezva na změnu osvitů panelu je aperiodická a k ustálení v MPP dochází po přibližně dvou sekundách. Další a hlavní zkoumanou vlastností systému je vzájemná nezávislost výkonů, které jednotlivé panely dodávají do měniče. V tomto ohledu je pozorován významný efekt na průběhu proudu panelu, který je kontinuálně osvětlen stabilním zdrojem světla. Je patrný dočasný pokles výkonu tohoto panelu v reakci na pokles osvětlení prvního panelu. Přestože měřený pokles výkonu je vzhledem k celkovému rozsahu výkonu a krátkému časovému intervalu považován za nepatrný, je toto pozorování důležité v kontextu optimalizace výkonu solárního systému.



Obr. 3.8 Průběh požadavků na amplitudu výstupního proudu do sítě od jednotlivých MPPT regulátorů

Obr. 3.8 ukazuje výstupní veličinu jednotlivých MPPT: I_{w1} , I_{w2} a jejich součet, celkové I_w . Výsledek je reakcí na průběh osvětlení, viz obr. 3.6. Požadavek I_{w2} zůstává ustálený i přes pokles osvětlení na prvním panelu. Takové chování simuluje například panely s různým sklonem a následné částečné zastínění panelu č. 1 objektem v jeho blízkosti například konstrukčním prvkem střechy, nebo korunou stromu.

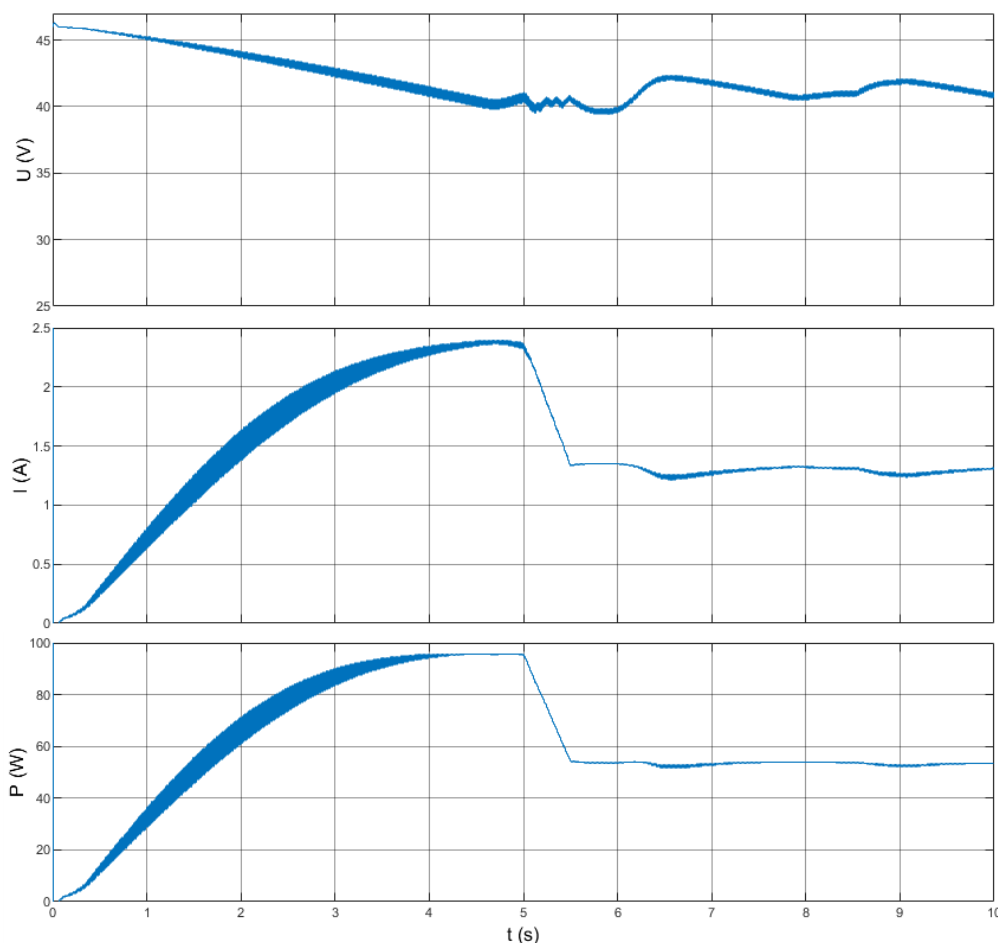


Obr. 3.9 Průběh napětí a proudu na výstupu střídače v ustáleném stavu (U_{AC} – napětí sítě)

Na obr. 3.9 jsou snímány výstupní veličiny střídače. Průběhy odpovídají zkoumanému stavu, kdy výkonová hustota slunečního záření dopadající na panely je různá ($I_{r1} = 280 \text{ W/m}^2$, $I_{r2} = 800 \text{ W/m}^2$). Výstupní napětí měniče je stále vícehladinové, nízká závislost velikosti napětí na okamžitém výkonu panelu je pro vícehladinový měnič příznivá.

3.1.5 Výsledky simulace s fotovoltaickými panely – FV panely zapojeny v sérii

Pro srovnání jsou uvedeny výsledky pro stejnou dvojici FV panelů a zkoumaný průběh osvětlení, avšak ve spojení s tříhladinovým střídačem. Zde je použitý pouze jeden H-můstek a dva panely jsou zapojeny v sérii, velikost napětí tedy je dvojnásobná, ale proud zůstává stejně velký. Parametry simulace zůstávají totožné, jako u předešlých výsledků, viz tabulka 3.2 a tabulka 3.3.



Obr. 3.10 Průběh napětí, proudu a výkonu panelů v reakci na změnu osvětlení viz Obr.3.6 (1 můstek)

Výsledky obr. 3.7 a obr. 3.10 ukazují reakci systému na totožný průběh osvětlení. Naproti tomu, že vstup je stejný, výstupní chování se odlišuje hned v několika parametrech. Maximální výkon v ustáleném stavu před změnou osvětlení je v součtu o přibližně 20 W vyšší u systému se dvěma měniči, než u tříhladinového měniče. Po snížení osvitů jednoho z panelů je tento rozdíl až 40 W.

Dynamické chování je naopak lepší u tříhladinového měniče. Po snížení osvitů nedochází k podkmitu výkonu.

3.2 Dílčí závěr

Cílem matematického modelu je ověřit funkci navrhovaného zařízení, před sestrojením laboratorního prototypu. Vytvořený matematický model by se měl vlastnostmi přibližovat fyzickému prototypu. Pomocí simulace byla ověřena schopnost generovat vícehladinový průběh napětí s fotovoltaickými panely jako zdrojem stejnosměrného napětí. Výsledky simulace ukázaly, že navržené algoritmy dokáží zajistit předání výkonu do jednofázové sítě s účinnkem $\cos \varphi \rightarrow 1$ a umožňují regulovat velikost proudu, čili výkonu přenášeného do uzlu sítě v závislosti na aktuálním osvětlení.

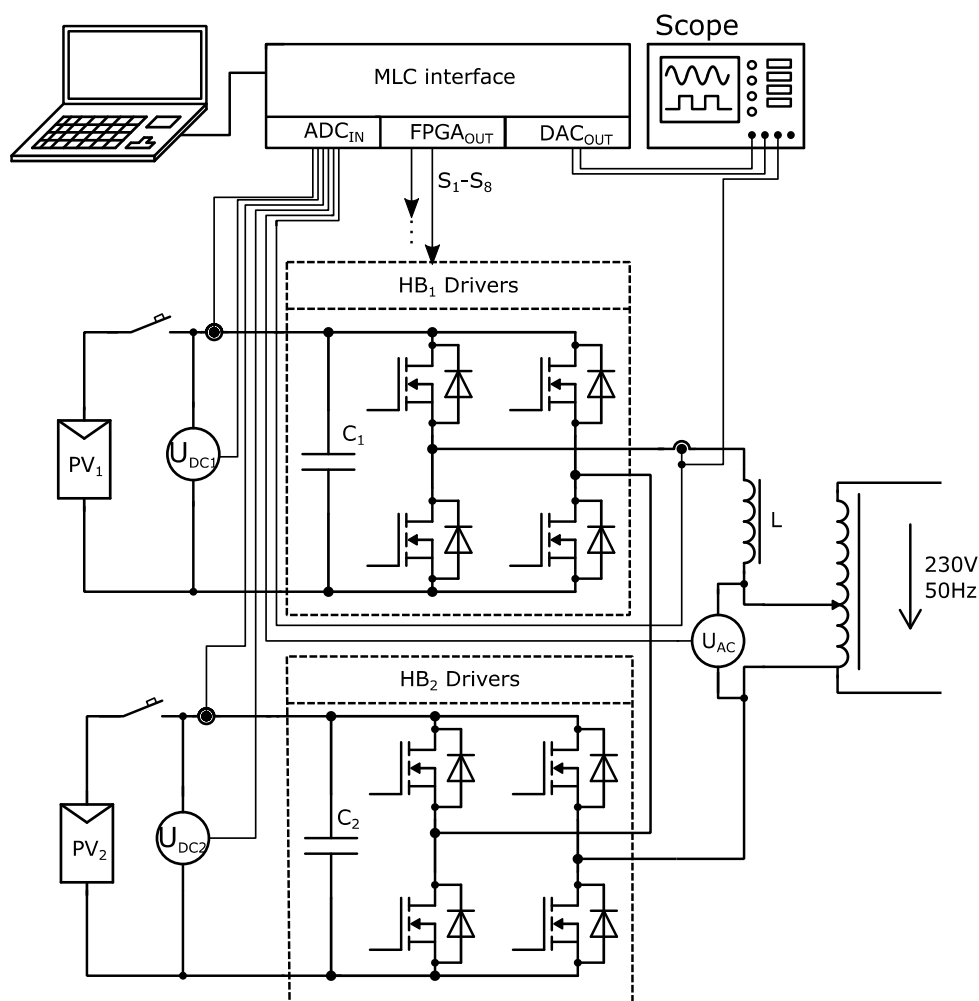
Byla ověřena schopnost navrženého systému fungovat tak, že jednotlivé fotovoltaické panely jsou na sobě zcela nezávislé, toto tvrzení je ilustrováno na obr. 3.7. Naopak klasický systém s jedním měničem a panely zapojenými v sérii vykazuje silnou limitaci výkonu, kdy panel s nižší intenzitou osvětlení významně limituje panel s vyšším osvětlením. Sériové zapojení omezuje velikost proudu a porovnání průběhů výkonu v čase s proměnným osvětlením jednoznačně ukazuje výhodu navrhovaného řešení.

Při daném průběhu osvětlení se vyskytují dva ustálené stavy. Součet výkonu dodávaného z panelů v navrhovaném systému s kaskádním měničem je v ustálených stavech 115 W a 95 W. Obvyklý způsob zapojení (FV panely v sérii a jeden společný střídač) dodává výkony 95 W a 55 W. Ztráta výkonu je tedy zcela zásadní a tím vyšší, čím větší je rozdíl mezi výkony dodávanými jednotlivými panely v sériovém zapojení. Celkový stejnosměrný výkon FV panelů je tedy v prvním případě u tříhladinového měniče o 17,4% nižší a po snížení osvětlení jednoho z panelů až o 42,1%.

Výsledek simulace je pro navrhovaný systém příznivý. Dalším krokem je sestavení laboratorního prototypu a ověření těchto výsledků.

4 Laboratorní prototyp

4.1 Sestavený prototyp

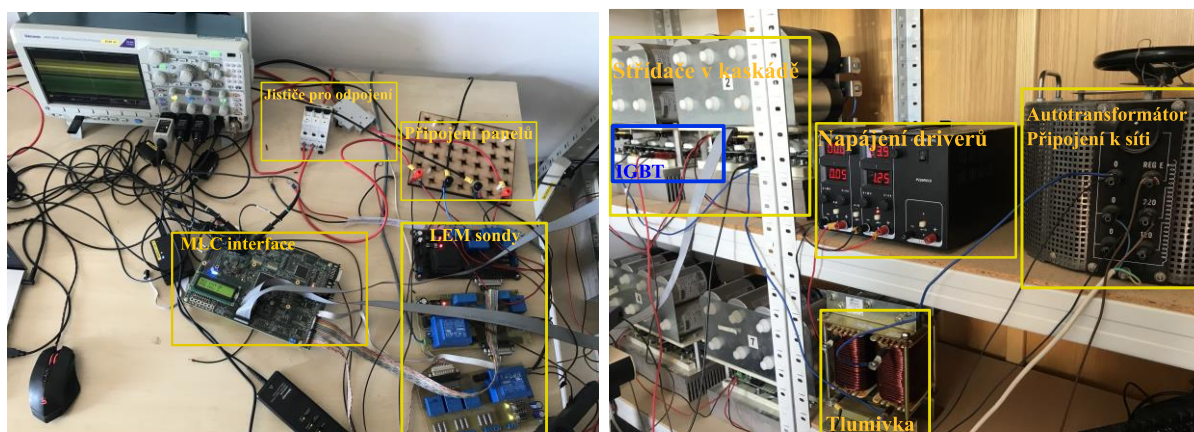


Obr. 4.1 Schéma zapojení laboratorního prototypu

Laboratorní prototyp tvoří dva jednofázové napěťové střídače – H-můstky spojené do kaskády. Systém je na střídavé straně připojen přes filtrační indukčnost a snižovací transformátor k jednofázové síti 230 V/50 Hz. Každý H-můstek je na své stejnosměrné straně napájen jedním FV panelem o instalovaném výkonu 90 W, viz obr. 4.3. Stejnosměrné i střídavé veličiny jsou snímány LEM sondami, kde je měřená analogová hodnota předána vstupním obvodům MLC interface. Tyto hodnoty jsou zpracovány AD převodníkem a data zpracovávají řídicí algoritmy. Následně jsou vyhodnoceny výstupní spínací signály S_1 - S_8 a předány jednotlivým můstkům.

Fotodokumentace prototypu

Na obr 4.2 a obr 4.3 vidíme sestavený laboratorní prototyp



Obr. 4.2 Řídící a měřicí část prototypu nalevo, Výkonová část a připojení k síti napravo



Obr. 4.3 Umístění fotovoltaických panelů

Vpravo na obr. 4.2 jsou vidět výkonové měniče, filtrační indukčnost, transformátor a napájecí zdroj. Vlevo na stejném obrázku je umístěna řídicí jednotka a měřicí přístroje.

Zařízení jsou umístěna v laboratoři. K řídicí jednotce MLC interface jsou připojeny výstupní analogové signály z měřících LEM sond. Spínací signály jsou přiváděny z výstupních kanálů FPGA na drivery střídačů. Osciloskop zobrazuje data získaná přímo z napěťové a proudové sondy, nebo data snímaná LEM sondami, která jsou převedena AD/DA převodníky řídicí jednotky a následně měřena sondou osciloskopu.

Drivery střídače jsou napájeny napěťovým regulovatelným zdrojem ze sítě. Na straně sítě je sériově zapojena tlumivka jako filtrační člen. Svorky jednofázové sítě představuje sekundární vinutí autotransformátoru.

Na obr 4.3 jsou vidět FV panely a jejich umístění. Připravené jsou celkem 4, ale k ověřování funkčnosti byly využity jen 2, stejně tak výkonové měniče na obr 4.2.

Parametry prototypu

Tabulka 4.1 Parametry laboratorního prototypu FVE s kaskádním měničem

FTV panel BlueSolar 90W		Parametry kapacity DC linku	
Maximální výkon	90 W	Výrobce	ZEZ SILKO
Napětí naprázdno	23,44 V	Kapacita jednotky C	500 μ F \pm 10%
Napětí při MPP	19,5 V	Jmenovité napětí	900 V
Teplotní koeficient U	-0,35 %/°C	Maximální proud	50 A
Článků v panelu	36	Celková kapacita baterie	4 mF
Proud nakrátko	4,98 A	Měřicí sondy LEM	
Proud při MPP	4,61 A	Proudová sonda	LA 55-P
Teplotní koeficient I	0,04 %/°C	Napěťová sonda	LV 25-P
Ostatní zařízení			
Autotransformátor		TZS Tlumivka SKYTL30-10	
Maximální zdánlivý výkon	2,5 kVA	Jmenovitý proud	30 A
Napětí sek. vinutí	0-250 V	Jmenovitá indukčnost	10 mH \pm 20%

Panely jsou upevněné, viz obr. 4.3, svisle na konstrukci zábradlí a normála směřuje na mírný jihovýchod. Všechny panely jsou nasměrovány stejně, až na malou odchylku do několika jednotek stupňů.

Při ožívování měniče byl systém odpojen od sítě a pracoval pouze do RL zátěže, kterou představuje použitá tlumivka, v cílové konfiguraci využita jako filtr, sériově připojený k výstupu měniče. Autotransformátor zajišťuje galvanické oddělení systému od sítě a snižuje napětí sítě na hodnotu vhodnou pro uzpůsobení napěťovým limitům prototypu.

K řízení je využitý MLC interface s mikrokontrolérem Texas Instruments TMS320F28335. Spolu s mikrokontrolérem je osazené FPGA Altera Cyclone III, které bylo použito pro implementaci PWM modulátoru s rozšířeným počtem výstupů potřebných pro řízení kaskádního měniče. V konfiguraci 5-CHB není FPGA plně opodstatněno, ale zařízení je připravené pro možnou implementaci dalších stupňů kaskádního měniče. K programování bylo využité aplikační rozhraní MLC API.[5]

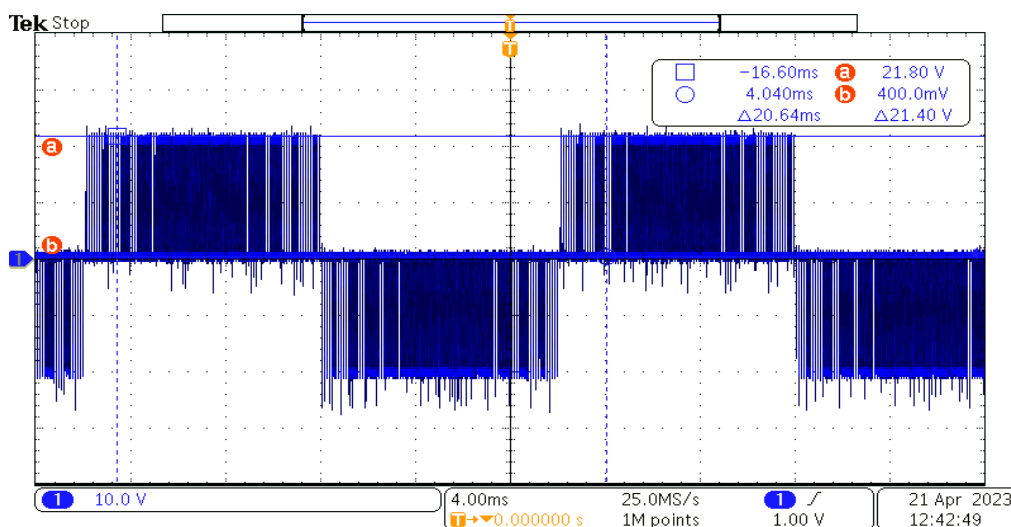
4.2 Experimentální výsledky

Výsledky jsou rozdělené na provoz střídače s konstantním zdrojem napětí, nebo s fotovoltaickými panely. Dále se výsledky dělí na výsledky s jedním můstkem a kaskádou.

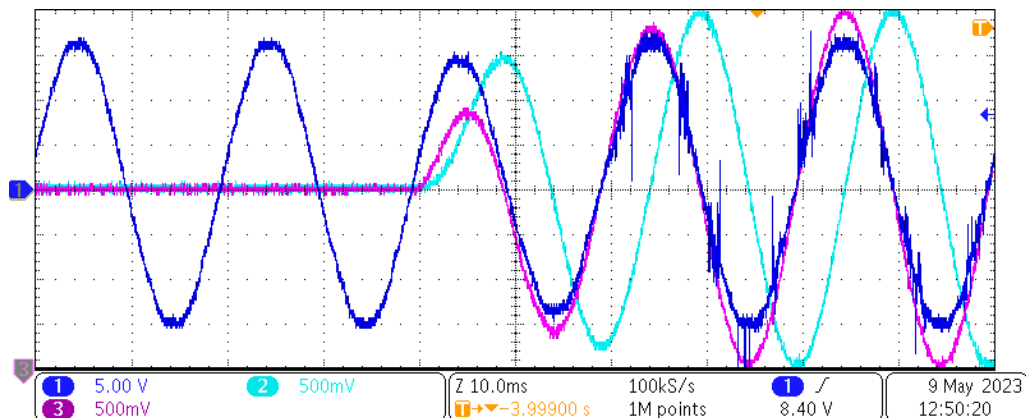
4.2.1 Výsledky se zdroji konstantního napětí

Výsledky s jedním můstkem

Jedná se o topologii, kde jsou panely spojené do série a připojené ke stejnosměrnému obvodu jediného střídače – jednofázového H-můstku.



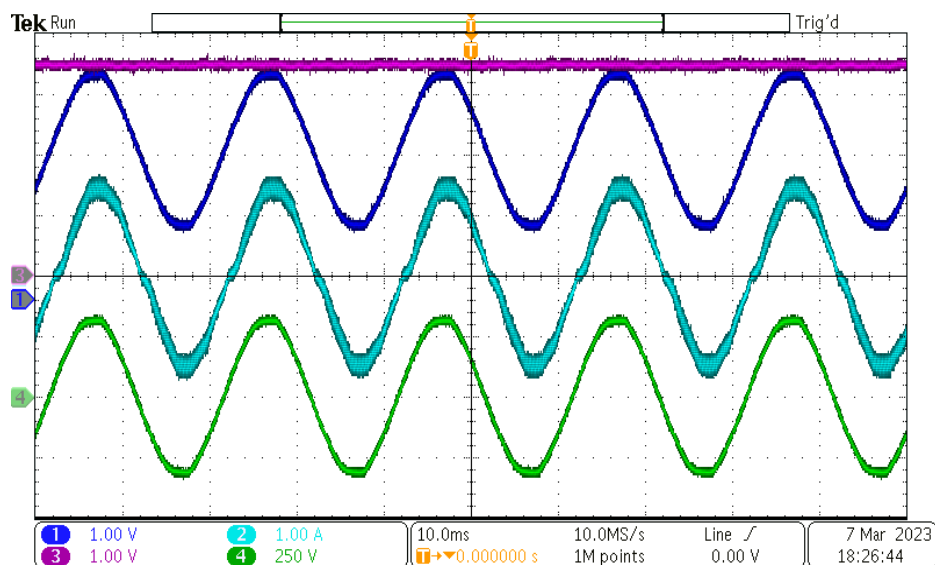
Obr. 4.4 Experimentální výsledky: Průběh výstupního napětí jednoho můstku naprázdno



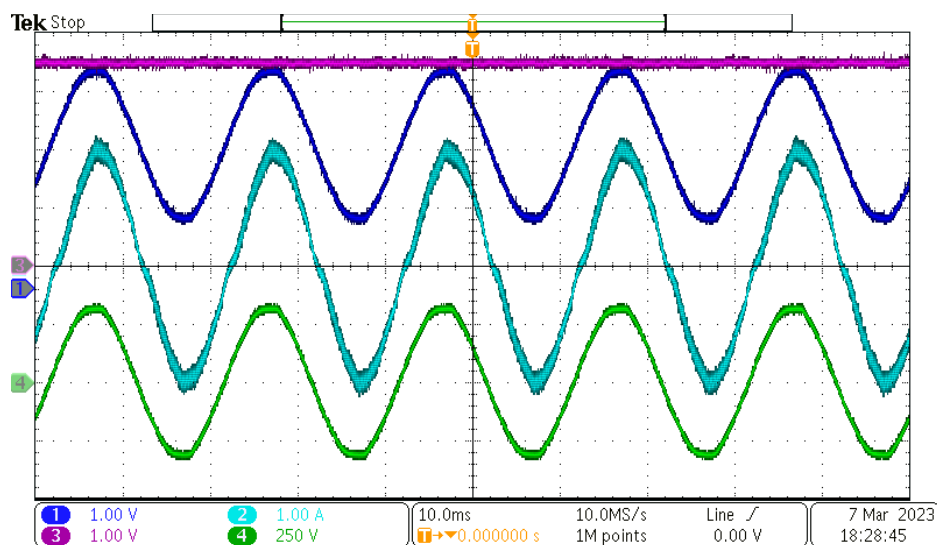
Obr. 4.5 Experimentální výsledky: Synchronizace se sítí pomocí algoritmu SOGI (CH1 - napětí sítě u_{AC} (vstup), napěťová sonda 5V/dílek, CH2 – složka odhadovaného vektoru napětí u_{β} DAC 4,096V/dílek, CH3 – složka odhadovaného vektoru napětí u_{α} DAC 4,096V/dílek)

Obr. 4.4 nahoře ukazuje výstupní napětí na svorkách střídače v ustáleném stavu. Je zde rozeznatelná amplituda napětí a správná frekvence odpovídající frekvenci sítě 50 Hz. Obr. 4.5 ukazuje průběh synchronizace s napětím sítě, kdy krátce po startu algoritmu SOGI dojde k aktivaci spínání měniče. Dochází ke správnému zavěšování na napětí sítě a i přes rušení je správně odhadována základní harmonická. Není patrný fázový posuv.

Obr. 4.6 a 4.7 dokazují správnou funkčnost regulace proudu sítě v konfiguraci s jedním můstkem a zdroji konstantního napětí. Amplituda proudu sítě (CH2) má odpovídat velikosti požadavku zadanému konstantou v programu.



Obr. 4.6 Experimentální výsledky: Průběhy napětí a proudu pro jeden můstek připojený do sítě (požadavek 1,5 A)
 CH1: Napětí sítě na sekundáru trafo U_{AC} -DAC 8,192V/dílek, CH2: proud sítě I_{AC} -proudová sonda 1A/dílek,
 CH3: Napětí dvojice panelů U_{DC} -DAC 8,192V/dílek, CH4: Napětí sítě na primáru trafo-diferenční sonda 250V/díl.

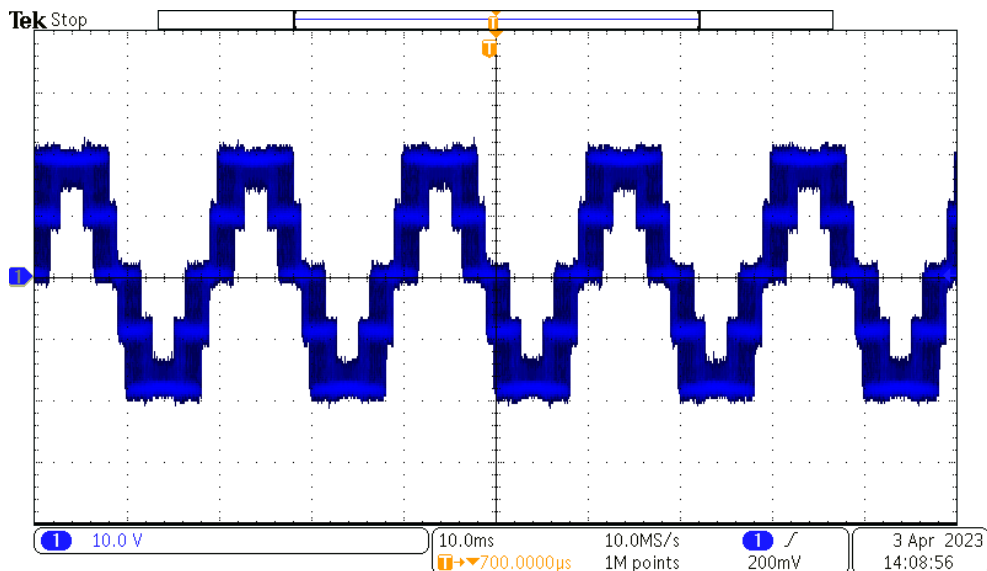


Obr. 4.7 Experimentální výsledky: Průběhy napětí a proudu pro jeden můstek připojený do sítě (požadavek 2 A)
 CH1: Napětí sítě na sekundáru trafo U_{AC} -DAC 8,192V/dílek, CH2: proud sítě I_{AC} -proudová sonda 1A/dílek,
 CH3: Napětí dvojice panelů U_{DC} -DAC 8,192V/dílek, CH4: Napětí sítě na primáru trafo-diferenční sonda 250V/díl.

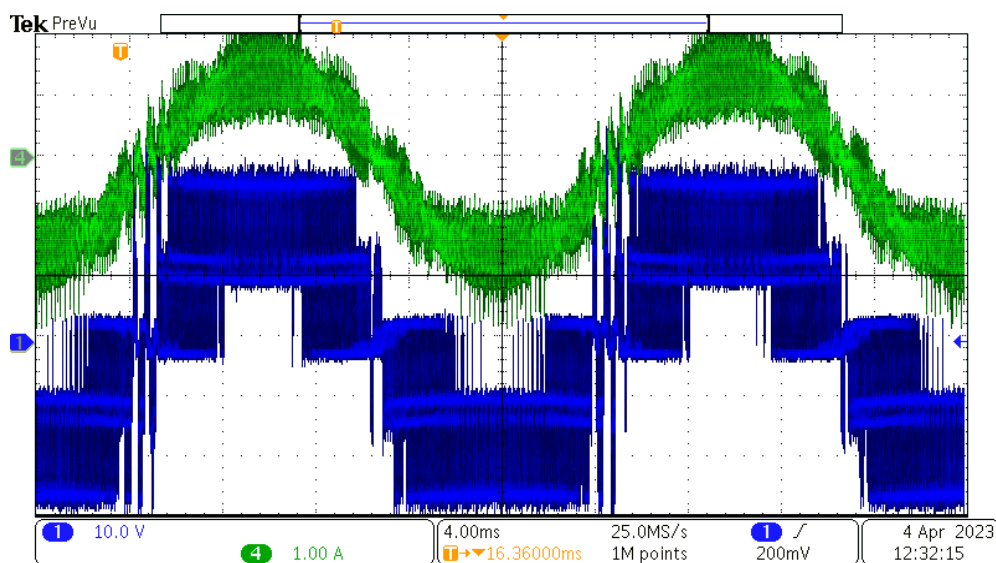
Reálná velikost U_{DC} po přepočtu odpovídá 28,672 V a napětí na sekundárním vinutí U_{AC} je 9,85 V. Výsledný průběh proudu je sinusový se zkreslením kolem přechodu nulou. Amplitudy proudu v obou případech odpovídají požadavku.

Výsledky experimentálního měření s kaskádním měničem (5-CHB)

Tato část obsahuje výsledky pro topologii navrhovanému prototypu kaskádního měniče se zdroji konstantního napětí, viz obr. 4.1. Obr. 4.8 a obr. 4.9 zobrazují naměřené střídavé veličiny bez zatížení a pod zatížením.



Obr. 4.8 Experimentální výsledky: Průběh výstupního napětí kaskády na prázdko 10V/dílek

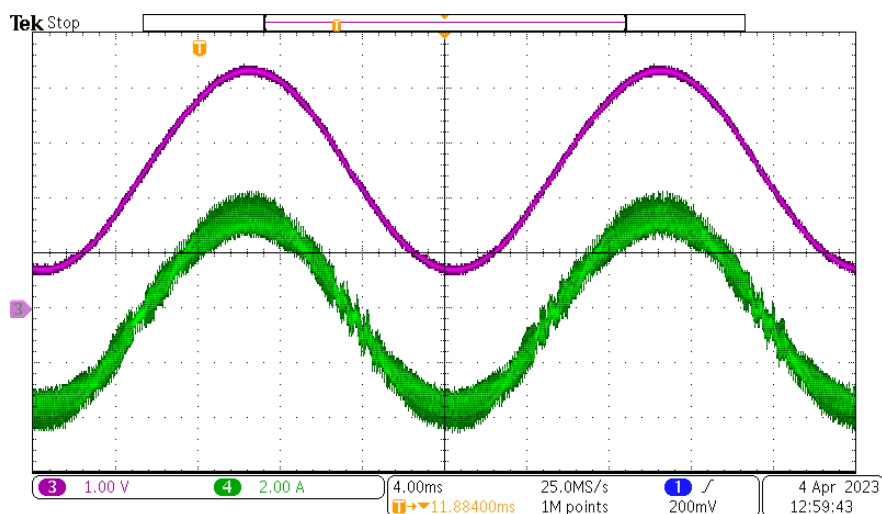


Obr. 4.9 Experimentální výsledky: Průběh výstupního napětí a proudu vícehladinového kaskádního měniče (5-CHB)

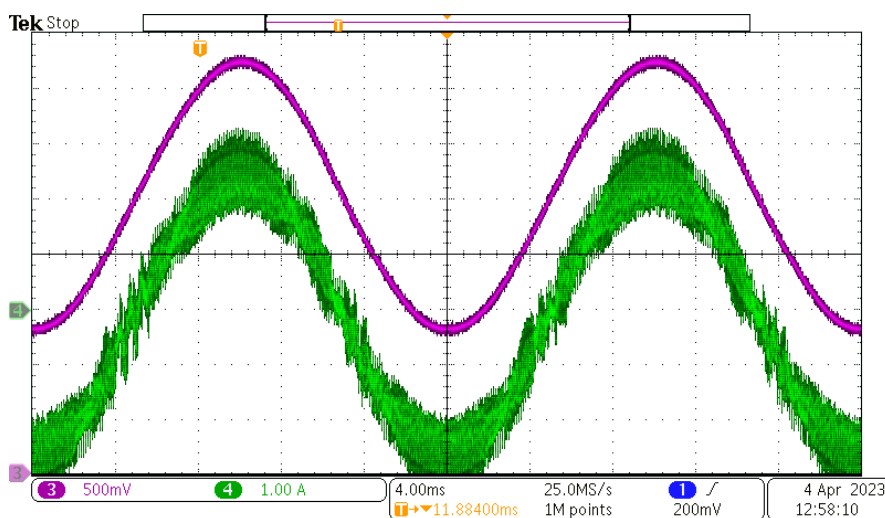
CH1: Průběh výstupního napětí kaskády - diferenční sonda (10V/dílek),
CH2: proud sítě – proudová sonda(1A/dílek)

Výstupní proud je zde silně zkreslený. Příčina by mohla být v napájení stejnosměrného obvodu z napěťového zdroje, který je připojený do stejné sítě, kam je připojený výstup střídače. Zároveň jsou na společnou zem připojeny všechny napěťové zdroje, osciloskop, řídicí jednotka, apod. Ve výsledcích vícehladinového střídače se zdrojem energie v podobě fotovoltaického panelu je zkreslení proudu značně potlačeno. Výstupní napětí kaskády je ve fázi s proudem dodávaným do sítě.

Na obr. 4.10 a 4.11 jsou průběhy výstupního napětí a požadovaného proudu (vstupu PR regulátoru) pro vícehladinový kaskádní měnič se zdroji konstantního napětí. Cílem je opět ověření regulace na základě požadované amplitudy proudu sítě.



Obr. 4.10 Experimentální výsledky: Průběhy naměřeného proudu sítě a vstupního požadavku (3A)
CH3: Požadovaný průběh proudu (vstup PR regulátoru) i_w DAC 1,6384 A/dílek,
CH4: Naměřený proud sítě I_{AC} – proudová sonda 1A/dílek



Obr. 4.11 Experimentální výsledky: Průběhy naměřeného proudu sítě a vstupního požadavku (2A)
CH3: Požadovaný průběh proudu (vstup PR regulátoru) i_w DAC 0,8192 A/dílek,
CH4: Naměřený proud sítě I_{AC} – proudová sonda 1A/dílek

Výsledný průběh proudu sítě i_{AC} je zvlněný, ale bez fázového posunu vůči požadovanému proudu i_w . Amplituda první harmonické proudu sítě I_{AC} přibližně odpovídá požadované amplitudě I_w .

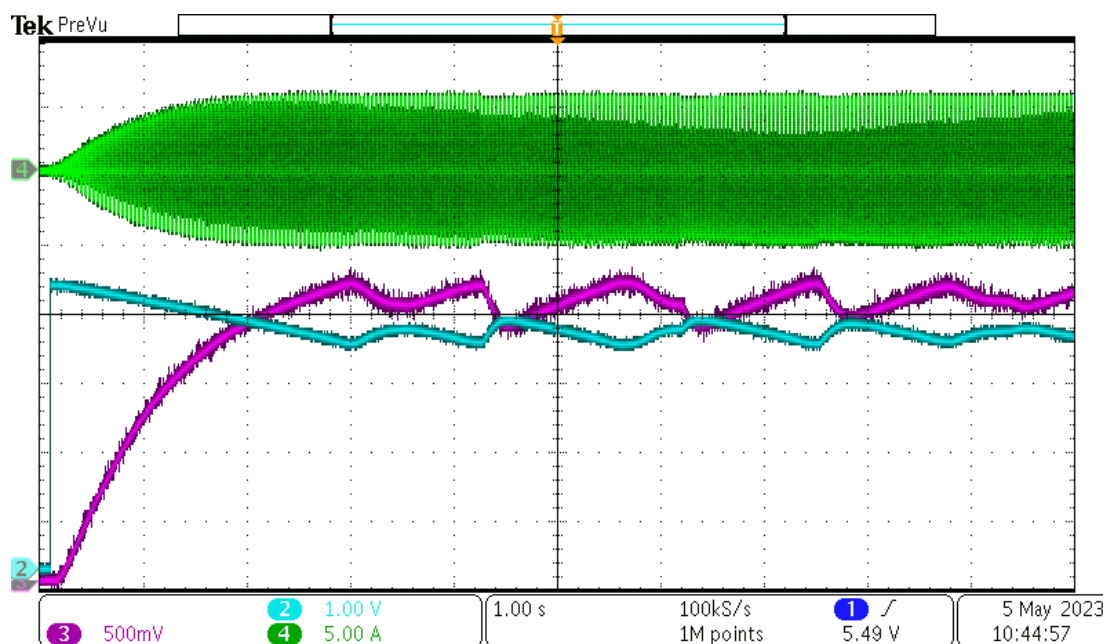
4.2.2 Výsledky experimentálního měření s FV panely

Měření probíhala vždy se dvěma zapojenými panely, v případě jednoho H-můstku byly sériově spojeny a součet jejich napětí přiveden na svorky kapacitního filtru na stejnosměrné straně jednoho H-můstku. Pro navrhovaný systém byl ke každému ze dvou H-můstků připojen jeden panel.

K osvětlení fotovoltaických panelů bylo využito přirozené světlo. Záměrem práce není zkoumat maximální výkon panelu, nýbrž poměrný rozdíl mezi navrhovaným a klasickým systémem. Při měření je vynaloženo úsilí srovnávat různé systémy za stejných světelných podmínek. Dodržení stejných podmínek není vždy absolutní, jelikož v čase mezi měřeními se zdroj záření pohybuje a úhel dopadu se mění. Systém je vystavován uměle navozeným stavům zastínění.

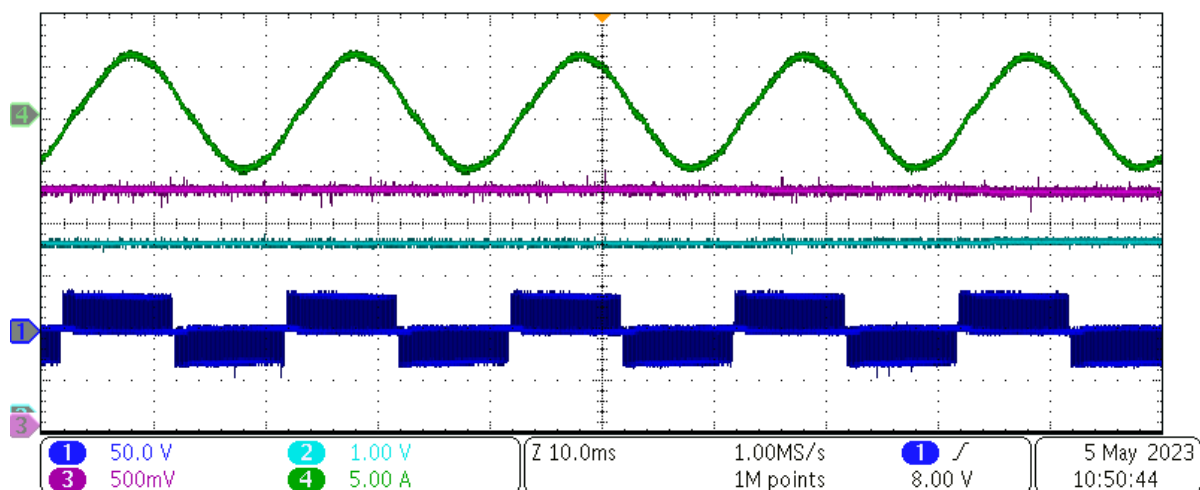
Výsledky s jedním můstkem

Topologie měniče odpovídá běžnému systému, kde panely jsou zapojeny do série a připojeny na stejnosměrnou stranu jednoho H-můstku.



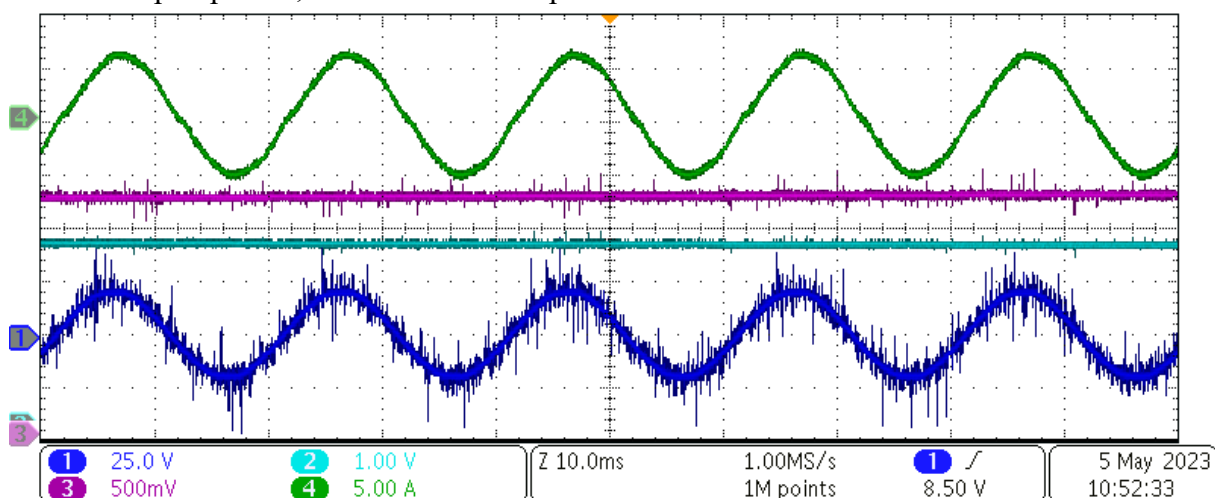
Obr. 4.12 Experimentální výsledky: Reakce systému sériově spojených FV panelů s jedním můstkem při spuštění spínání
 CH2: Napětí FV panelů U_{DC} –DAC 10,24V/dílek,
 CH3: Proud FV panelů I_{DC} –DAC 0,4096 A/dílek , CH4: Proud síť I_{AC} – proudová sonda 5A/dílek

Stejnoseměrné napětí je v tomto případě součtem napětí panelů. Napětí a proud na stejnosměrné straně se po dosažení MPP plně neustálí. Z průběhů lze vyčíst, že výsledný součin, tedy výkon, je zvlněný méně, protože pulsy proudu a napětí jdou v protifázi. Tento závěr je ověřen u dalších výsledků, viz obr. 4.15, kde je výkon dopočítán a zobrazen.



Obr. 4.13 Experimentální výsledky: Detail výstupních a vstupních průběhů střídače s jedním můstkem
 CH1: Průběh napětí tříhladinového měniče – diferenční sonda 50V/dílek, CH2: Napětí FV panelů U_{DC} –DAC 10,24V/dílek,
 CH3: Proud FV panelů I_{DC} –DAC 0,4096 A/dílek, CH4: Proud sítě I_{AC} – proudová sonda 5A/dílek

Ilustrace výše ukazuje detail k obr. 4.12. Proud a napětí panelu jsou v rámci krátkého časového úseku přibližně konstantní. Výstupní napětí je tříhladinové a jeho amplituda je součtem napětí panelů, v ustáleném stavu přibližně 35 V.

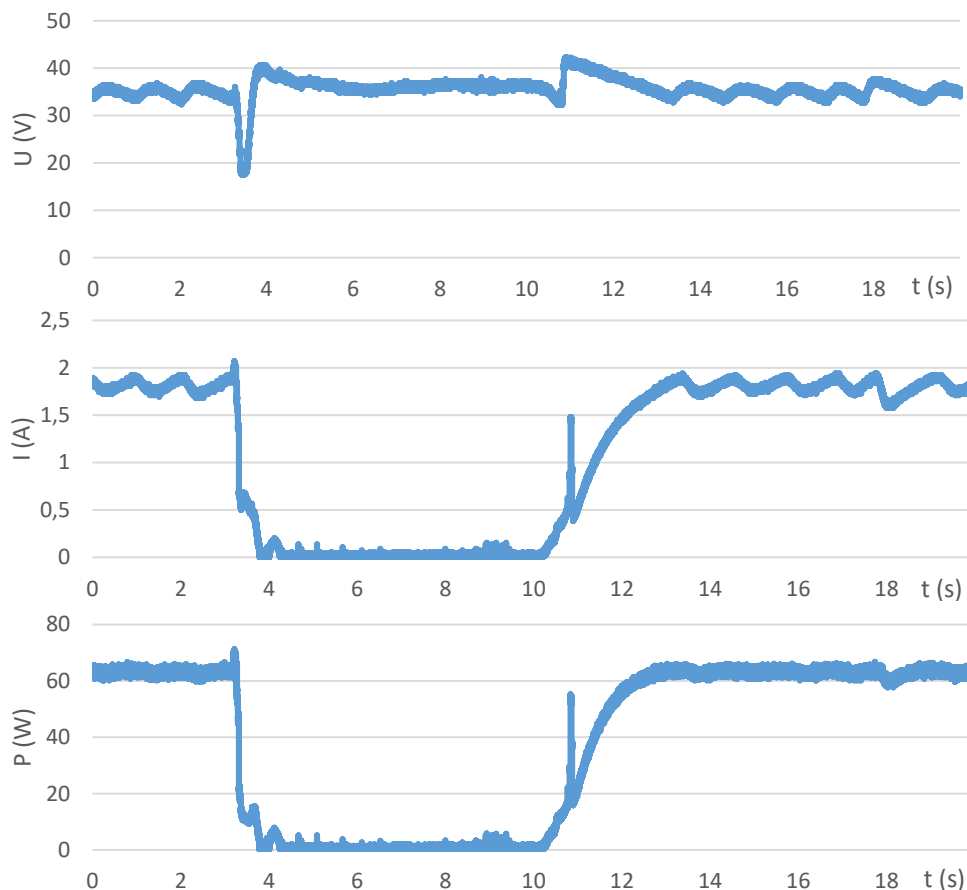


Obr. 4.14 Experimentální výsledky: Detail výstupních a vstupních průběhů střídače s jedním můstkem
 CH1: Průběh napětí sítě u_{AC} – diferenční sonda 25V/dílek, CH2: Napětí FV panelů U_{DC} –DAC 10,24V/dílek,
 CH3: Proud FV panelů I_{DC} –DAC 0,4096 A/dílek, CH4: Proud sítě I_{AC} – proudová sonda 5A/dílek

Obr. 4.14 ukazuje, že systém generuje harmonický průběh proudu ve fázi s napětím sítě a je dodáván výkon s účinníkem $\cos \varphi \rightarrow 1$. Průběh napětí sítě na kanálu CH1 vykazuje znatelné rušení v podobě napěťových impulsů.

Reakce systému sériově spojených FV panelů s jedním H-můstkem na změnu osvětlení

Obr. 4.15 ukazuje průběh napětí, proudu a výkonu sériově spojených FV panelů s napájecích jediný H-můstek. Na naměřených průbězích je zřejmá oscilace kolem MPP v ustáleném stavu. V okamžiku cca 3 sekundy dojde k částečnému zastínění jednoho z panelů a výkon klesne zcela na nulu. Zastíněný panel je přetížený a napětí rapidně klesá.

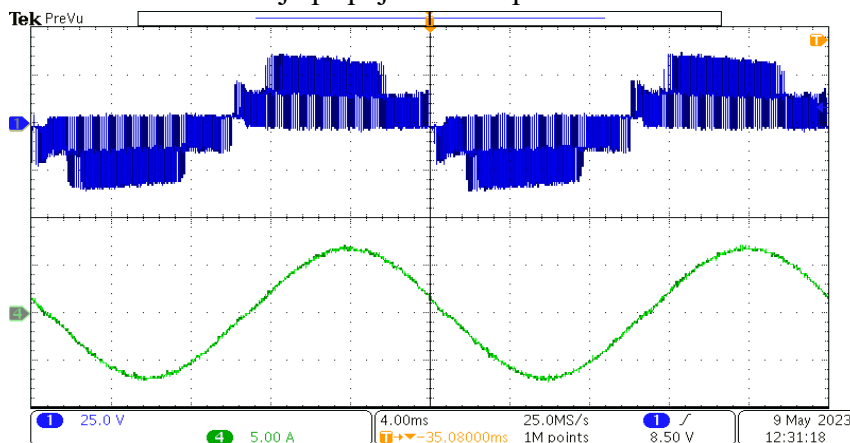


Obr. 4.15 Experimentální výsledky: Průběh napětí, proudu a výkonu FV panelů při zastínění. (součet stejnosměrného napětí stringu panelů, proud FV panelů a výkon stringu)

MPPT algoritmus reaguje rychlým snížením požadavku na velikost výstupního proudu, čím se vrací napětí stringu zpět na původní hodnotu. Proud v sériové kombinaci je omezen zastíněným panelem. Zastíněný je pouze jeden panel, ale celkový výstupní výkon je nulový. Po přibližně 10 sekundách dochází k opětovnému odstínění panelu a výkon postupně narůstá na původní hodnotu. V tomto okamžiku dochází ke skokovému nárůstu stejnosměrného napětí stringu FV panelů a MPPT algoritmus postupně přidává na požadavku výstupního proudu, čím se napětí stringu snižuje a proud zvyšuje.

Výsledky experimentálního měření FVE s kaskádním měničem (5-CHB)

Výsledky v této kapitole jsou zaměřeny na konečný navrhovaný prototyp vícehladinového kaskádního měniče, kde jsou jednotlivé FV panely připojeny k příslušnému H-můstku a střídavá strana měniče je připojena k síti přes filtrační tlumivku.

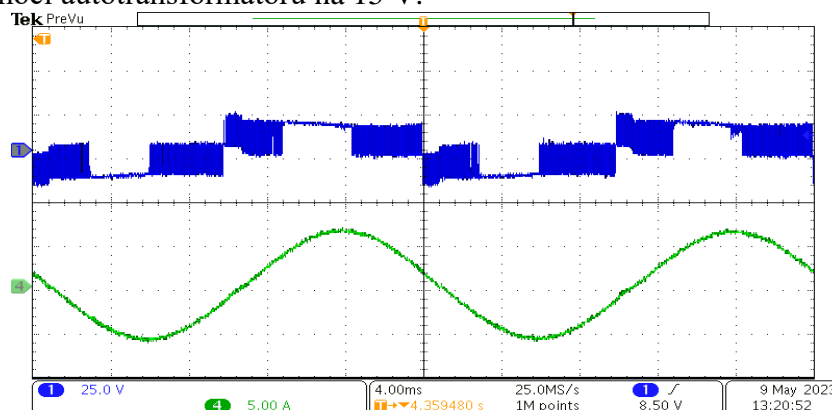


Obr. 4.16 Experimentální výsledky: Průběh napětí na svorkách střídače a proudu sítě při konstantním osvětlu pro 5CHB,

CH1: napětí kaskády – diferenciální sonda 25V/dílek, CH4: proud sítě i_{AC} – proudová sonda 5A/dílek

Na obr. 4.16 i 4.17 je průběh proudu sítě je nezkraslený sinus ve fázi s napětím sítě.

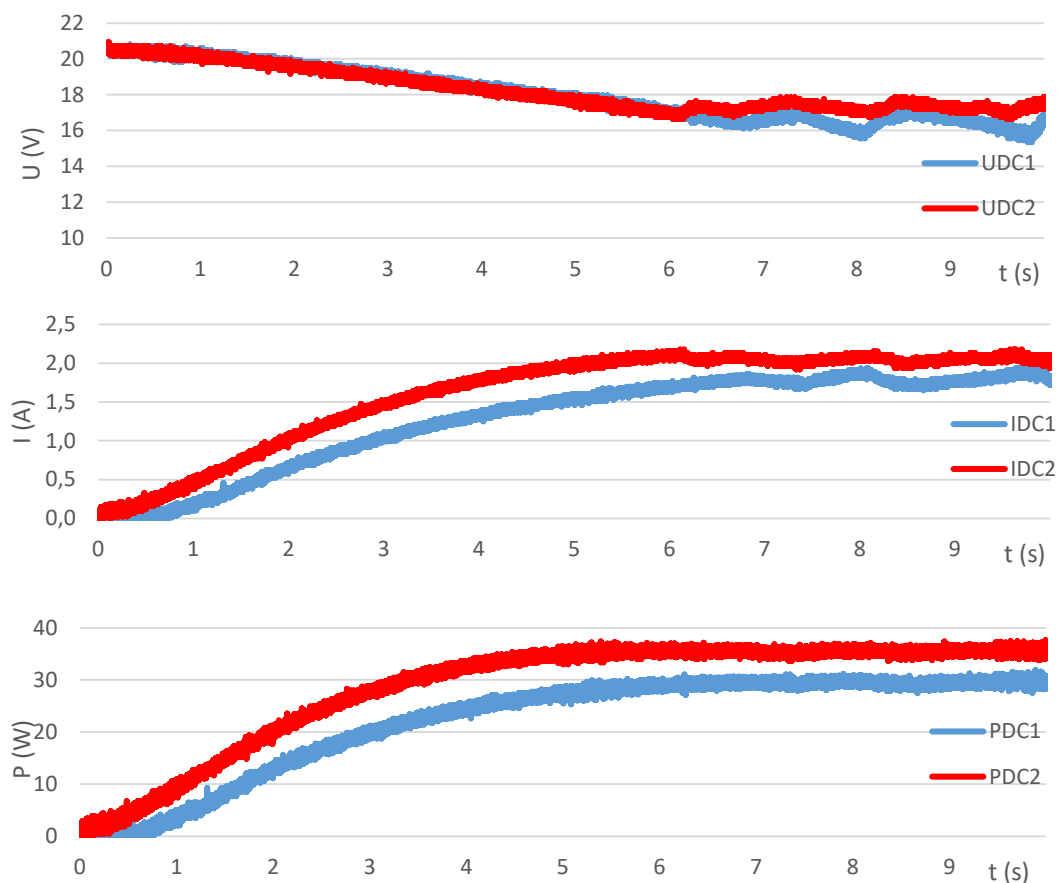
Panely byly vystaveny stabilnímu osvětlu s vysokou intenzitou. Amplituda napětí sítě je zde nastavena pomocí autotransformátoru na 15 V.



Obr. 4.17 Experimentální výsledky: Průběh napětí na svorkách střídače a proudu do zátěže při zastínění jednoho panelu pro 5CHB

CH1: napětí kaskády – diferenciální sonda 25V/dílek, CH4: proud sítě i_{AC} – proudová sonda 5A/dílek

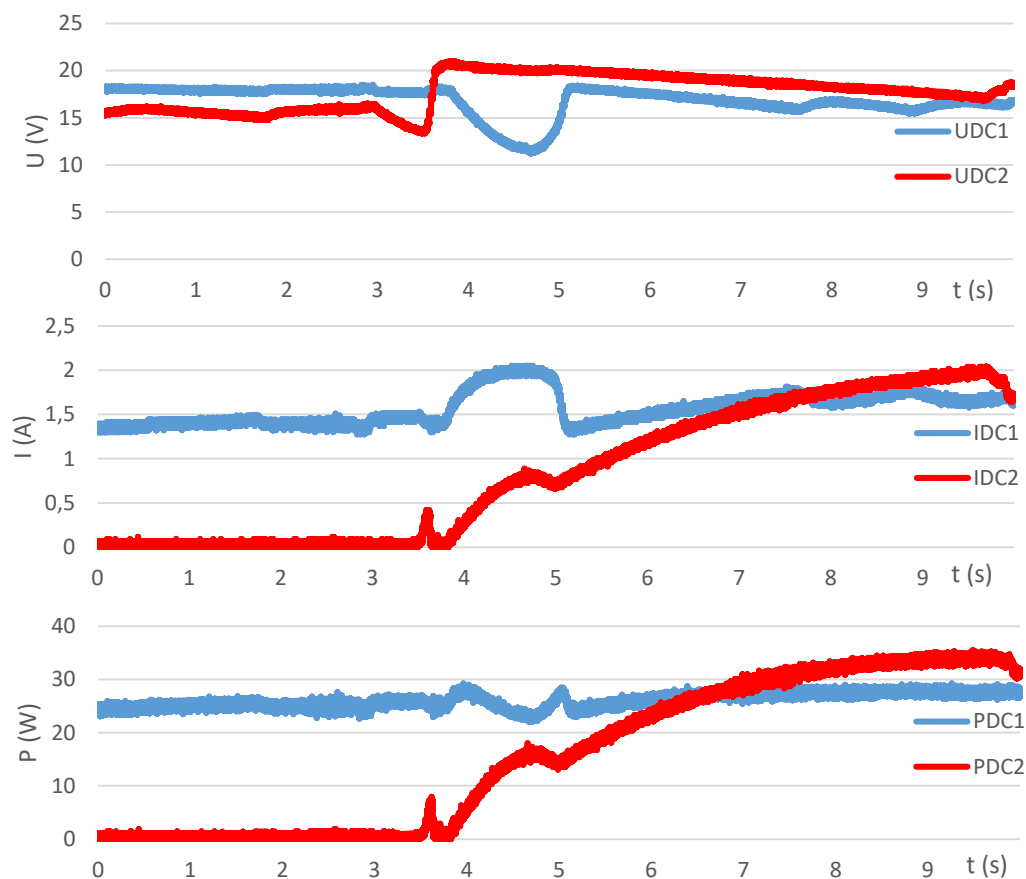
Dalším experimentálním výsledkem na obr. 4.17 je průběh napětí a proudu při zastínění jednoho z panelů. Pro tento případ je nutné zvolit nižší amplitudu napětí sítě, zde byla nastavena na 8 V. V případě, že je amplituda ponechána na 15 V, výstupní proud je vlivem zásahu omezovače v PWM silně zkraslený, protože napětí jednoho FV panelu není dostatečné pro zmíněnou velikost napětí sítě 15 V. Napětí je zde již pouze tříhladinové, jelikož jeden z panelů není schopen dodávat žádný výkon. Napětí přestává být pulsní při překročení maximální hladiny modulace v oblasti, kde sinusový průběh dosahuje maxima. Zde byl dosažen limit nejnižšího napětí sítě, které bylo možné nastavit na použitém autotransformátoru.



Obr. 4.18 Experimentální výsledky: Napětí, proud a výkon jednotlivých FV panelů při startu spínání kaskádního měniče

V rámci experimentu byly na jednotlivých panelech naměřeny v ustáleném stavu různé hodnoty výkonu. Výsledky ukazují odlišné vlastnosti panelů i při téměř stejném osvětlení. Je důležité podotknout, že oba panely jsou natočeny vůči slunci téměř pod stejným úhlem. Tato pozorovaná odlišnost naznačuje přítomnost výrobních odchylek mezi panely. Přestože tvar křivek a doba nalezení MPP jsou prakticky totožné u obou prvků kaskády, existuje stále malá odchylka (přibližně 5 W v ustáleném stavu). Tento výsledek potvrzuje výhodu navrhovaného prototypu oproti sériově spojeným panelům, kde je výstupní výkon každého panelu téměř identický, bez ohledu na jeho aktuální MPP.

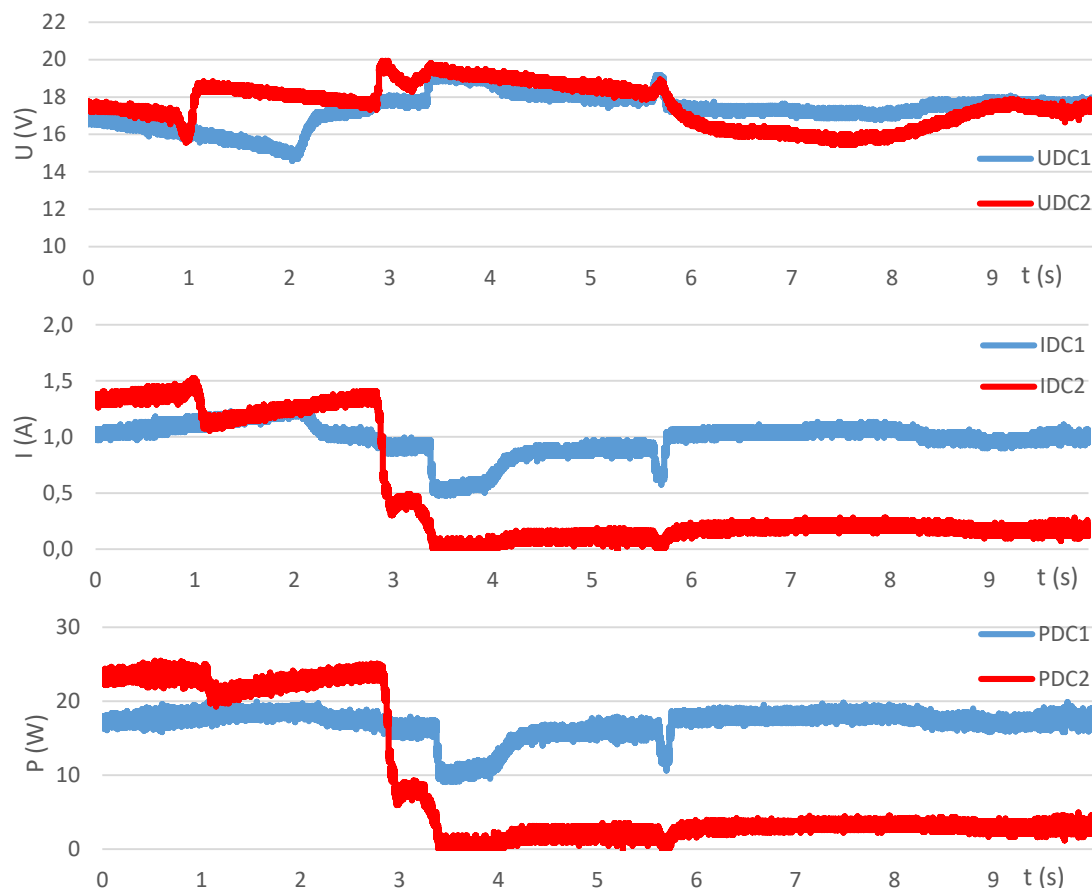
Přechodový proces při jednotkovém skoku intenzity osvětlení do ustáleného stavu v MPP trvá přibližně 6 sekund. Strmost nárůstu výkonu byla snížena s cílem minimalizovat zvlnění výkonu v ustáleném stavu. Zesílení MPPT regulátoru, viz obr. 2.11, pro nárůst proudu N_P bylo nastaveno na hodnotu 0,001, zatímco při požadavku na pokles proudu N_M bylo nastaveno na hodnotu 0,02. Tímto způsobem byl regulátor nastaven tak, aby reakce na zastínění byla rychlejší než reakce na nárůst osvětlení. Jak již bylo zmíněno, pomalá reakce na zastínění znamená příliš velké zpoždění v regulační smyčce a nestabilitu, kdy dochází k přetížení FV panelu.



Obr. 4.19 Experimentální výsledky: Průběh napětí, proudu a výkonu jednotlivých FV panelů kaskádního měniče – zpočátku zastíněný jeden panel a následně přechod do plného výkonu

Průběhy na obr. 4.19 ukazují přechodový děj, kdy jeden z panelů byl nejprve plně zastíněný do času 3,5 sekundy. Výkon druhého nezastíněného panelu je ustálený a maximální. Okamžikem zvýšení osvětlení panelu číslo dvě dochází k hledání MPP stejným způsobem, jako na obr 4.18, kde byl zachycen přechodový jev při startu spínání. Stejně jako v simulaci je zde vidět malá závislost velikosti výkonu prvního panelu, na změnách výkonu druhého panelu. Po nárůstu napětí na druhém panelu dojde k poklesu napětí na prvním a opětovném hledání MPP. Tato reakce je hlavně znatelná na proudu a napětí, ale výkon je ovlivněn tímto stavem méně zásadně.

Doba hledání MPP je stejná jako u předchozích průběhů (cca 6 s). Součtový výkon v prvním ustáleném stavu je 25 W a na konci přechodového děje cca 65 W.



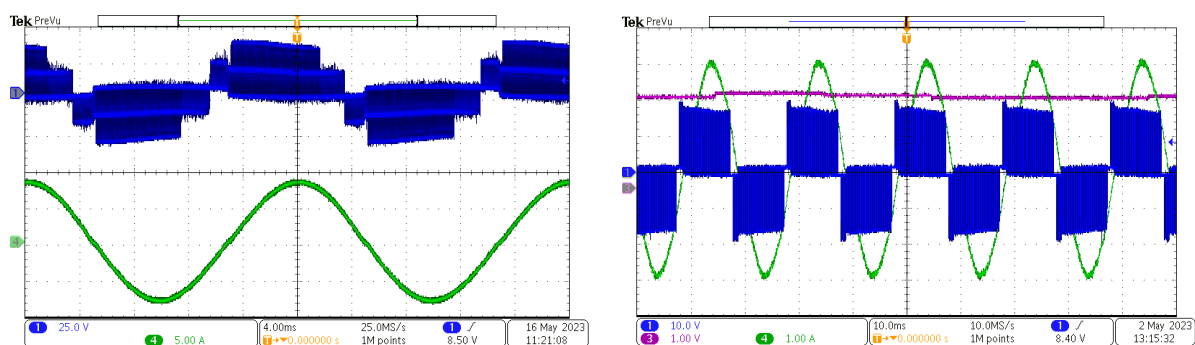
Obr. 4.20 Experimentální výsledky: Průběh napětí, proudu a výkonu jednotlivých FV panelů kaskádního měniče – přechod z plného výkonu k zastínění jednoho panelu

V rámci experimentu bylo pozorováno částečné zastínění panelu č. 2 s počátkem v čase 3 sekundy. V tomto čase došlo ke zvýšení stínění panelu, což vyvolalo reakci systému. Tato reakce byla podobná reakci na kladnou změnu osvětlení. Opět bylo zaznamenáno, že při strmé změně intenzity osvětlení jednoho panelu dochází k přechodovému ději na druhém panelu, výkon na krátký čas. Měřený výkon MPP byl v tomto případě o několik wattů nižší než při předchozích měřeních. Tento pokles výkonu byl způsoben změnou úhlu dopadu slunečního svítu na panel. Experiment proběhl s časovým odstupem od minulého.

Po ustálení přechodového děje se výkon nezastíněného panelu postupně vrátil na svou maximální hodnotu. FV panel č. 2 však stále vykazoval výkon v řádu jednotek wattů vlivem pouze částečného zastínění.

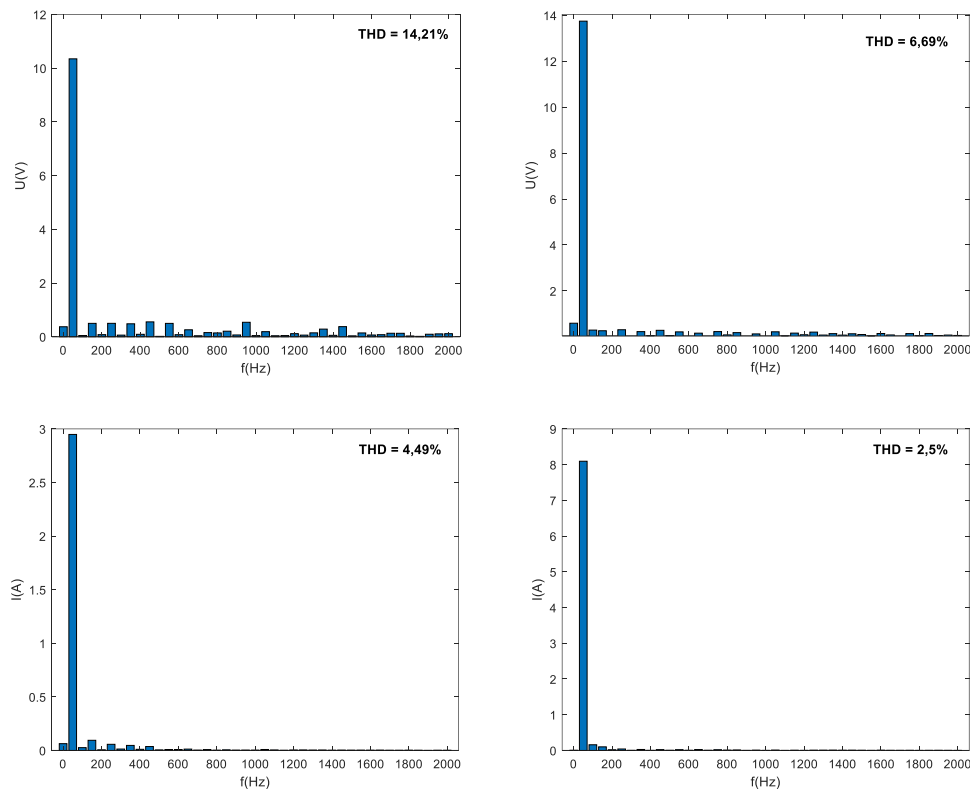
Výkon FV panelů je před poruchou v součtu přibližně 42 W. Zastíněný byl panel vykazující vyšší maximální výkon a ustálený stav po zastínění odpovídá přibližně 20 W. To je zhruba poloviční pokles výkonu v reakci na zastínění jednoho z dvojice FV panelů. Při stejném uměle vytvořeném stavu zastínění u běžné sériové kombinace FV panelů, viz obr. 4.3, je součtový výkon před zastíněním 60 W a při poruše blízky nule. Oproti navrhovanému řešení, kde výkon poklesl o 50%, zde je pokles 100%.

Srovnání zkreslení (THD) výstupního signálu



Obr. 4.21: Vybrané ustálené stavy pro harmonickou analýzu – vlevo navrhovaný prototyp, vpravo sériově zapojené FV panely CH1: Napětí na střídavých svorkách střídače – diferenciální sonda, CH2: Proud sítě – proudová sonda

Na obr. 4.21 jsou vybrané průběhy napětí a proudu v ustáleném stavu, na kterých je provedena harmonická analýza. Jedním z přínosů vícehladinového průběhu je nižší obsah vyšších harmonických. Takové zkreslení se porovnává pomocí ukazatele Total Harmonic Distortion (THD). V rámci experimentu provedeny harmonické analýzy pro porovnání kvality výstupního napětí střídače v běžném zapojení s jedním H-můstkem a vícehladinového kaskádního měniče. Výsledkem harmonické analýzy jsou složky frekvenčního spektra. Na obr. 4.22 jsou zobrazeny složky spektra průběhu napětí a proudu od stejnosměrné složky, až po 40. harmonickou.



Obr. 4.22 Experimentální výsledky: DFT analýza napětí a proudu sítě pro běžný měnič s panely v sérii a jedním H-můstkem (vlevo) a navrhované řešení s panely zapojenými k jednotlivým H-můstkům kaskádního měniče (5-CHB) (vpravo)

5 Závěr

V rámci této diplomové práce byl v laboratorním prostředí sestaven prototyp malé fotovoltaické elektrárny připojené k jednofázové síti pomocí kaskádního vícehladinového měniče. Každý panel je připojen ke svému vlastnímu stupni kaskády, jednofázovému střídači v můstkovém zapojení. Během experimentálního měření bylo provedeno porovnání s FVE v klasickém uspořádání sériově spojených panelů připojených k síti pomocí jediného H-můstku.

Byly navrženy algoritmy řízení s PR regulátorem proudu sítě a MPPT regulátory pro sledování bodu maximálního výkonu FV panelů. Synchronizace s napětím sítě byla zajištěna pomocí algoritmu SOGI (dvojitého integrátoru). Funkce navržených algoritmů byla nejprve ověřena pomocí matematického modelu. Postupně byly odzkoušeny jednotlivé algoritmy a systém byl otestován především změnami intenzity osvětlení. Výsledky získané pomocí matematického modelu odpovídají předpokládanému chování. Velkým přínosem simulace byla možnost odladit MPPT regulátor mimo laboratoř.

Během následujících experimentů na laboratorním prototypu byla ověřena funkčnost systému i předpoklad výrazně vyšší účinnosti FVE s kaskádním měničem. Prototyp byl podroben modelovým situacím, kdy byly aplikovány změny intenzity osvětlení na jednotlivé FV panely. Naměřené výsledky potvrdily shodu s výsledky simulací a ukázaly, že navržený prototyp má významné výhody oproti běžně používané technologii sériově řazených fotovoltaických panelů. Při zapojení dvou panelů bylo v experimentu potvrzeno, že výkon FVE s kaskádním měničem klesne při zastínění jednoho FV panelu přibližně na 50%. Běžnému sériovému zapojení FV panelů při stejném zastínění klesne výkon o 100%. Při zapojení více panelů se výhoda navrhovaného prototypu vůči běžnému systému zvyšuje. Kromě původního očekávaného přínosu prototyp dodává téměř konstantní maximální výkon nezastíněného panelu, bez ohledu na výrobní rozdíly a drobné odlišnosti v natočení vůči zdroji osvětlení.

Posledním výsledkem experimentu mluvícím ve prospěch navrhovaného řešení je porovnání THD tří a pětihladinového měniče. V tomto konkrétním případě zkruslení vícehladinového průběhu napětí i proudu je přibližně dvakrát menší, než u srovnávaného zařízení.

Všechny cíle této diplomové práce byly splněny, ačkoliv na prototypu je stále prostor pro další rozvoj. Měření lze rozšířit až o další 4 hladiny napětí, tím by například výstupní zkruslení dále pokleslo. Dalším stupněm vývoje by byl malý prototyp integrovatelný přímo do svorkovnice panelu.

Literatura

- [1] D. Rajesh Reddy, Dr. R. Veera Sudarasana Reddy, *Study on Series and Parallel Connected Solar Photovoltaic System under Shadow Conditions*. Online. IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSR-JEEE), ročník 11, číslo 1, Ver. I (leden - únor 2016), strany 36-40, e-ISSN: 2278-1676, p-ISSN: 2320-3331. Dostupné z: www.iosrjournals.org DOI: 10.9790/1676-11113640 [cit. 2023 - 05- 22].
- [2] Giovanni Cipriani, V. Di Dio, A. Marcotulli, Rosario Miceli, *Manufacturing Tolerances Effects on PV Array Energy Production*, in Proceedings of the 2014 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA). Online. October 2014, DOI: 10.1109/ICRERA.2014.7016526. [cit. 2023 - 05- 22].
- [3] João Lucas de Souza Silva, Hugo Soeiro Moreira, Marcos Vinicios Gomes dos Reis, Tarcio André dos Santos Barros, Marcelo Gradella Villalva, *Theoretical and behavioral analysis of power optimizers for grid-connected photovoltaic systems*. Online. Energy Reports, ročník 8, 2022, strany 10154-10167, ISSN 2352-4847. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.07.154> [cit. 2023 - 05- 19].
- [4] Košan, T. *Vybrané problémy z řízení vícehladinových měničů a výpočetně extrémně náročných pokročilých algoritmů regulace elektrických pohonů implementovaných v hradlových polích*. Online. Plzeň, 2015. Disertační práce, Západočeská univerzita v Plzni. Dostupné z: [DSPACE ZČU https://dSPACE5.zcu.cz/bitstream/11025/20657/1/main_moderni_regulatory-final.pdf](https://dSPACE5.zcu.cz/bitstream/11025/20657/1/main_moderni_regulatory-final.pdf) [cit. 2023-04-11].
- [5] Kakkan Ramalingam, Chandrasen Indulkar, "Chapter 3 - Solar Energy and Photovoltaic Technology", in G.B. Gharehpetian, S. Mohammad Mousavi Agah (eds.). Online. Distributed Generation Systems, Butterworth-Heinemann, 2017, strany 69-147, ISBN 9780128042083. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804208-3.00003-0> [cit. 2023 - 04- 20].
- [6] Bc. Pilný, O. *Víceúrovňové měniče*. Online. Plzeň, 2014. Diplomová práce, Západočeská univerzita v Plzni; vedoucí práce: Ing. Pavel Drábek, Ph.D.] DSPACE ZČU. https://dSPACE5.zcu.cz/bitstream/11025/15383/1/Viceurovne_menice-Ondrej_Pilny.pdf [cit. 2023-04-10].

- [7] M. Pamujula, A. Ohja, R. D. Kulkarni, P. Swarnkar, "*Cascaded 'H' Bridge based Multilevel Inverter Topologies: A Review*," in Proceedings of the 2020 International Conference for Emerging Technology (INCET), Belgaum, India, 2020, strany 1-7, DOI: 10.1109/INCET49848.2020.9154031. [cit. 2023 - 04- 15].
- [8] Chitransh A., Kumar S. *The Different Type of MPPT Techniques for Photovoltaic System*. Online. Indian Journal of Environment Engineering (IJE), 2021. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/353635803_The_Different_Type_of_MPPT_Techniques_for_Photovoltaic_System [cit. 2023 - 04- 10].
- [9] F. Liu, S. Duan, F. Liu, B. Liu and Y. Kang, *A Variable Step Size INC MPPT Method for PV Systems*. Online. In IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 55, no. 7, pp. 2622-2628, July 2008, doi: 10.1109/TIE.2008.920550. [cit. 2023-05-14].
- [10] F. Xiao, L. Dong, L. Li and X. Liao, *A Frequency-Fixed SOGI-Based PLL for Single-Phase Grid-Connected Converters*. Online. In IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 32, no. 3, pp. 1713-1719, March 2017, doi: 10.1109/TPEL.2016.2606623. [cit. 2023-05-14].
- [11] Bc. Stejskal, P. *Modulační techniky pro víceúrovňové střídače*. Online. Praha, 2015. Diplomová práce, České vysoké učení technické v Praze; vedoucí práce: Ing. Pavel Kobrle, Ph.D. DSpace ČVUT. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/61749?show=full> [cit. 2023-04-12].
- [12] Cha H., T-K. Vu and J-E. Kim *Design and control of Proportional-Resonant controller based Photovoltaic power conditioning systém*. Online. Chungnam National University. Online. Daejon, Korea, 2009. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/224077507_Design_and_control_of_Proportional-Resonant_controller_based_Photovoltaic_power_conditioning_system [cit. 2023-04-20].
- [13] Kari Lappalainen, Seppo Valkealahti, *Analysis of shading periods caused by moving clouds*. Online. Solar Energy, Volume 135, 2016, Pages 188-196, ISSN 0038-092X, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.05.050>. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X16301670> [cit. 2023-04-27].

- [14] Shang, L., Guo, H. & Zhu, W. *An improved MPPT control strategy based on incremental conductance algorithm*. Online. Prot Control Mod Power Syst 5, 14 (2020). <https://doi.org/10.1186/s41601-020-00161-z> [cit. 2023-04-13].