

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta Elektrotechnická

Katedra elektroenergetiky



Bakalářská práce

Tomáš Majzner

Specifika připojení fotovoltaické elektrárny do distribuční sítě
VN v České republice

Specifics of connecting photovoltaic power plant to the high
voltage distribution grid

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Aplikovaná elektrotechnika

Vedoucí práce: Vít Klein, Ph.D.

Praha 2020

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Majzner** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **474760**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektroenergetiky**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Specifika připojení fotovoltaické elektrárny do distribuční sítě VN

Název bakalářské práce anglicky:

Specifics of connecting photovoltaic power plant to the high voltage distribution grid

Pokyny pro vypracování:

- 1) Struktura FVE.
- 2) Podmínky připojení FVE do distribuční sítě VN.
- 3) Vliv FVE na distribuční síť VN.
- 4) Výpočet vlivu FVE pomocí modelu v softwaru MATLAB.

Seznam doporučené literatury:

1. LIBRA, Martin a Vladislav POULEK. Fotovoltaika: teorie i praxe využití solární energie. 2., dopl. vyd. Praha: Ilsa, 2010. ISBN 9788090431157.
2. HASELHUHN, Ralf. Fotovoltaika: budovy jako zdroj proudu. Ostrava: HEL, 2011. ISBN 978-80-86167-33-6.
3. Nařízení komise (EU) 2016/631 ze dne 14. dubna 2016, kterým se stanoví kodex sítě pro požadavky na připojení výroben v elektrizační soustavě
4. ENTSO-E Network Code for Requirements for Grid Connection Applicable to all Generators.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Mgr. Vít Klein, Ph.D., katedra elektroenergetiky FEL

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

Datum zadání bakalářské práce: **30.01.2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: **22.05.2020**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2021**

Ing. Mgr. Vít Klein, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
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 zde předloženou bakalářskou práci na téma „Specifika připojení fotovoltaické elektrárny do distribuční sítě VN“ vypracoval samostatně a že jsem veškeré použité informační zdroje uvedl v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne:

Tomáš Majzner

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce panu Vítu Kleinovi, Ph.D., za cenné rady a pomoc při zpracování bakalářské práce. Dále chci poděkovat mé rodině, která mě podporovala nejen při psaní bakalářské práce, ale i během celého studia.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá stavbou fotovoltaických elektráren a jejich připojení, popisuje princip jednotlivých částí tohoto systému a náležitostí jejího připojení do distribuční soustavy vysokého napětí v České republice. Dále také popisuje problematiku fotovoltaické elektrárny, jako zdroje elektrické energie závislé na počasí, na distribuční soustavu. Součástí práce je model fotovoltaické elektrárny připojené do distribuční sítě v softwaru MATLAB.

Klíčová slova

Fotovoltaická elektrárna, fotovoltaický článek, pravidla provozování distribuční soustavy, negativní vlivy na distribuční soustavu, model fotovoltaické elektrárny

Abstract

This bachelor thesis deals with construction of photovoltaic power plant and their connection, it describes individual components of the system and requirements for connection to the high voltage distribution grid in Czech Republic. Furthermore it discusses problems of photovoltaic power plant, as source of electric energy dependent on weather, on distribution grid. Thesis includes a model of photovoltaic power plant connected do distribution grid in MATLAB environment.

Keywords

Photovoltaic power plant, solar cell, requirements for operation in distribution grid, negative influence on distribution grid, model of photovoltaic power plant

Obsah

Seznam symbolů a zkratk.....	8
1 Úvod.....	9
2 Struktura fotovoltaické elektrárny.....	10
2.1 Fotovoltaické pole.....	10
2.1.1 Fotovoltaický článek.....	11
2.1.2 Fotovoltaický panel.....	14
2.1.3 Nosné konstrukce.....	14
2.2 Elektronické měniče.....	15
2.3 Kabely.....	16
2.4 Transformátor.....	16
2.5 Odpínání a jištění.....	16
2.6 Měření.....	18
2.7 Rozvaděč.....	18
3 Podmínky připojení.....	19
3.1 Technické konzultace.....	20
3.2 Žádost o připojení.....	20
3.3 Posouzení žádosti o připojení.....	21
3.4 Studie připojitelnosti výroby.....	21
3.5 Projektová dokumentace.....	22
3.6 Připojení k síti.....	23
3.7 Dálkové řízení.....	23
4 Chování nesynchronní výroby v síti VN.....	24
4.1 Frekvenční rozsah.....	25
4.2 Napěťový rozsah.....	25
4.3 Podpora sítě.....	26

4.3.1	Statická podpora napětí	26
4.3.2	Dynamická podpora sítě.....	28
4.3.3	Regulace činného výkonu	29
4.3.4	Automatické připojení výroben.....	30
5	Zpětné vlivy na napájecí síť	31
5.1	Změna napětí.....	31
5.2	Proudy vyšších harmonických	31
5.3	Tlumení signálu HDO	33
6	Model FVE o výkonu 1 MW připojené do DS VN.....	34
6.1	Popis modelu.....	34
6.1.1	Fotovoltaické pole.....	35
6.1.2	Střídač	36
6.1.3	Meziobvod	37
6.1.4	Distribuční soustava	38
6.1.5	Subsystem „MPPT functions“	39
6.1.6	Subsystem „PWM pulses“	39
6.1.7	Subsystem „Measurement“	39
7	Posouzení vlivu FVE na DS VN.....	40
7.1	Změna napětí.....	40
7.2	Proudy vyšších harmonických	41
7.3	Shrnutí výsledků	43
8	Závěr	44
9	Seznam použité literatury.....	45
	Seznam obrázků	48
	Seznam tabulek	49

Seznam symbolů a zkratk

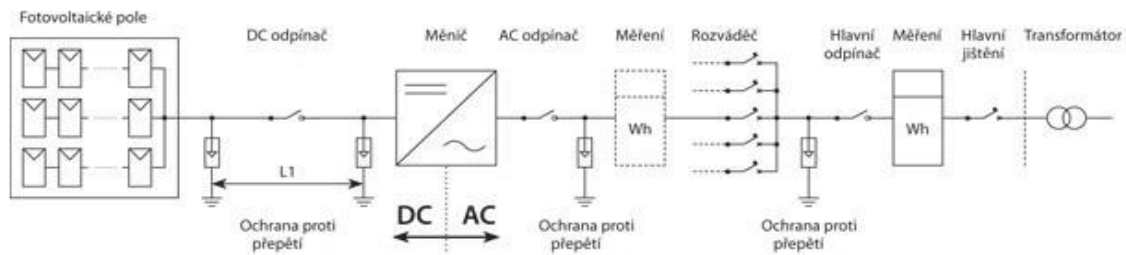
DS	Distribuční soustava
ERÚ	Energetický regulační úřad
FVE	Fotovoltaická elektrárna
HDO	Hromadné dálkové ovládání
NN	Nízké napětí
PDS	Provozovatelé distribuční soustavy
PPDS	Pravidla provozování distribuční soustavy
PS	Přenosová soustava
RfG	NAŘÍZENÍ KOMISE 2016/631 (Requirements for Generation)
VM	Výrobní modul
VN	Vysoké napětí

1 Úvod

Obnovitelné zdroje energie jsou v posledních letech velmi sledovaným odvětvím energetiky v České republice. Jejich hlavní výhodou, jak už název napovídá, je jejich úplná nebo částečná obnovitelnost. Elektrárny obnovitelných zdrojů, jako například sluneční, větrné, nebo vodní, při svém provozu produkují malé množství nebo dokonce žádné škodlivé látky. Rozvoj a výstavba těchto elektráren je velmi podporována, neboť přispívá k omezení skleníkových plynů, ke kterému se Česká republika jako člen Evropské Unie přihlásila v Pařížské dohodě. Ačkoliv zní výstavba elektráren obnovitelných zdrojů velmi dobře, jsou zde i některá rizika spojená s jejich provozem, která začínají být velmi patrná při velkém podílu obnovitelných zdrojů v energetickém mixu České republiky. Cílem této práce je seznámit čtenáře s popisem elektrárny využívající jeden z obnovitelných zdrojů energií, slunce, pro výrobu energie elektrické. Dále jsou pak popsána pravidla pro připojení a provoz této elektrárny, zakončené modelem ukazující problematiku jejího provozu.

2 Struktura fotovoltaické elektrárny

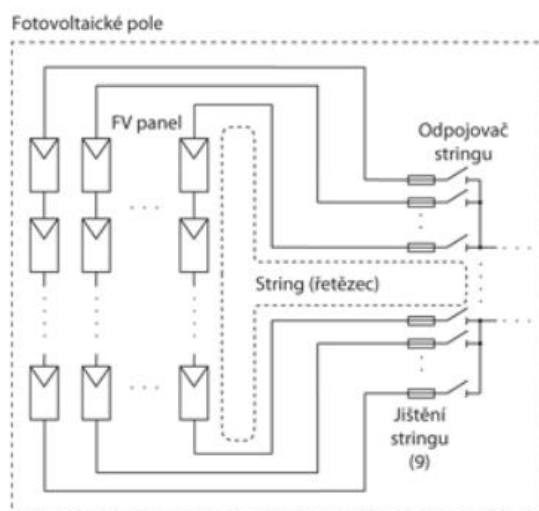
Fotovoltaickou elektrárnou rozumíme systém, který přímo přeměňuje sluneční energii na energii elektrickou, upravuje hladinu jejího napětí a dodává ji do ostrovní sítě nebo DS. Obr. 2-1 ukazuje obecné schéma FVE s jejími nejdůležitějšími komponenty a spojením k DS. Komponenty jsou detailněji popsány v následujících kapitolách.



Obr. 2-1 Obecné schéma FV zdroje pracujícího paralelně s distribuční sítí¹

2.1 Fotovoltaické pole

Fotovoltaické pole je složení více fotovoltaických panelů, které jsou v sérii spojeny do řetězců (stringů). Pole mohou obsahovat několik takto složených stringů, které jsou jednotlivě vybaveny jisticími a ochrannými prvky, které v případě poruchy nebo v případě omezení funkčnosti části stringu ochrání zbylé prvky. Detailnější popis fotovoltaického článku a fotovoltaického panelu je v následujících podkapitolách.



Obr. 2-2 Detail fotovoltaického pole²

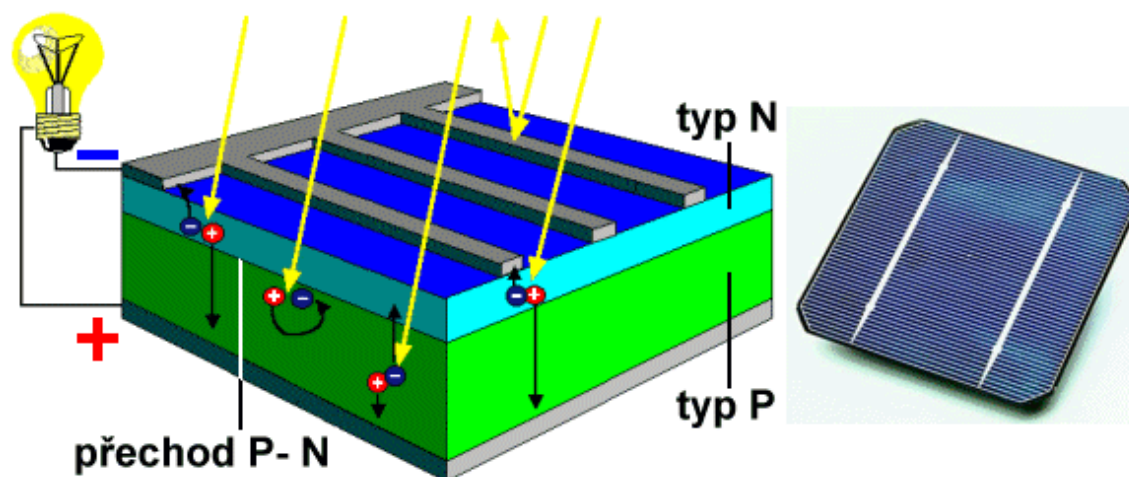
¹ OEZ S.R.O. Obecné schéma FV zdroje pracujícího paralelně s distribuční sítí. In: OEZ [online]. c2018 [cit. 2020-03-27]. Dostupné z: <http://www.oez.cz/aktuality/obecne-schema-zapojeni-fotovoltaickeho-zdroje>

² Tamtéž.

2.1.1 Fotovoltaický článek

Fotovoltaický článek je zařízení, většinou na bázi krystalického křemíku, které zprostředkovává přímou přeměnu sluneční energie na energii elektrickou. Jedná se o polovodičovou diodu tvořenou polovodičem typu P a typu N. Tyto vrstvy dohromady jsou odděleny P-N přechodem. Princip fungování fotovoltaického článku je založen na fotoelektrickém jevu, který nám říká, že při absorpci elektromagnetického záření látkou dochází k uvolnění elektronů z obalu atomu. V případě fotovoltaických článků se jedná o absorpci slunečního záření, které dopadá na jeho povrch.³

Při dopadu slunečního záření na polovodičovou vrstvu N dochází k uvolnění valenčního elektronu, který přeskóčí do vrstvy P a zaplní zde díru. To způsobí, že vrstva N je nyní kladně nabitou a vrstva P záporně nabitou, a tedy vznikne zde elektrické pole. Elektrické pole nám zajistí uspořádaný přechod poskytující elektrický proud. Hlubší poznání této problematiky je možno vysvětlit na pásovém modelu atomu křemíku a není pro naše účely nutné⁴. Obrázek P-N přechodu fotovoltaického článku můžeme vidět na Obr. 2-3.



Obr. 2-3 Fotovoltaický článek⁵

Křemíku se pro fotovoltaické články nejčastěji používá kvůli jeho dostupnosti, neboť je druhým nejrozšířenějším prvkem v zemské kůře. Mezi jeho další výhody patří, že není toxický a jeho vlastnosti jako polovodiče jsou již dobře prozkoumány. Pro výrobu článků se používá křemíku

³ LIBRA, Martin a Vladislav POULEK. Fotovoltaika: teorie i praxe využití solární energie. Praha: Ilsa, 2009. ISBN 978-80-904311-0-2.

⁴ REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. Fyzikální podstata fotoelektrického jevu. Encyklopedie fyziky [online]. c2006-2020 [cit. 2020-03-27]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/723-fyzikalni-podstata>

⁵ ČEZ, a. s. Fotovoltaický článek [online]. In: . c2020 [cit. 2020-05-05]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/obr/k32-1.gif>

o čistotě až 99,9999 % ve formě polykrystalu, monokrystalu nebo amorfni vrstvy. Ve speciálních případech se začíná používat i materiál jiný než křemík.⁶

Čistý polykrystalický křemík se získává pomocí chemických úprav křemene. Redukcí křemen uhlíkem v obloukové peci můžeme dosáhnout čistoty až 99 %. Dalším stupněm zpracování je převedení křemíku na těkavou látku trichlorsilan pomocí chlorovodíku o vysoké teplotě. Trichlorsilan se poté vyčistí pomocí destilace a pomocí dekompozice s vodíkem dostaneme čistý křemík. Monokrystalický křemík se nejčastěji získává Czochralského metodou, která spočívá v pomalém tažení roztaveného křemíku v inertní atmosféře. Křemík je roztaven ve speciálním grafitovém kelímku, který je součástí Czochralského tažičky, a je do něj přidán požadovaný dopant. Pro polovodič typu P se používá bor, hliník nebo galium. Do roztaveného křemíku se poté vloží zárodek monokrystalického křemíku válcového průměru, na kterém postupně narůstá krystal. Při tažení je důležité, aby se zárodek na lanku pomalu otáčel, aby křemík postupně a rovnoměrně krystalizoval. Výsledkem tohoto tažení je až dva metry dlouhý křemíkový ingot válcového průřezu. Polykrystalický křemík je jednodušší na výrobu. Čistý křemík roztavíme ve vybrané nádobě a necháme zkrystalizovat. Výhodou polykrystalického křemíku je jeho cena a možnost libovolných tvarů. Nevýhodou pak menší účinnost. Na Obr. 2-4 můžeme pozorovat rozdíly v barvě a jednotnosti polykrystalického a monokrystalického článku. Účinnosti monokrystalických článků se pohybují okolo 21 %, polykrystalických pak 19 %.⁷



Obr. 2-4 Křemíkový článek a) polykrystalický b) monokrystalický⁸

⁶ LIBRA, Martin a Vladislav POULEK. Fotovoltaika: teorie i praxe využití solární energie. Praha: Ilsa, 2009. ISBN 978-80-904311-0-2.

⁷ BENDA, Vítězslav. Výukové materiály k předmětu Elektrochemické zdroje a fotovoltaika (B1B13SEZ): Konstrukce a technologie PV článků a modulů.

⁸ TINDO SOLAR. Poly vs Mono Crystalline. Tindo Solar [online]. c2020 [cit. 2020-03-25]. Dostupné z: <https://www.tindosolar.com.au/learn-more/poly-vs-mono-crystalline/>

Krystaly křemíku se dále řezou pomocí drátové pily na destičky o tloušťce přibližně 200 μm , které se dále upravují pro použití v článcích. Během řezání krystalu dochází ke ztrátě až 40 % vstupního materiálu. Na destičky nařezaný křemík je texturován pomocí leptání hydroxidem draselným. Na jednu texturovanou vrstvu nanášíme pomocí difúze vrstvu fosforu, která nám bude tvořit polovodič typu N. Pro zvýšení absorpce fotonů je nutné snížit odrazivost přední strany článku, proto se na přední stranu nanáší antireflexní vrstva.⁹

Dalším možným využitím křemíku pro výrobu fotovoltaických článků je využití křemíku s amorfni strukturou. Tento typ se připravuje rozkladem vhodných sloučenin křemíku ve vodíkové atmosféře a následným nanesením tenké vrstvy na skleněné nebo plastové podložky. Tenké vrstvy je možné nanášet pomocí technologie vakuové depozice, jako je například napařování a naprašování nebo pomocí chemické depozice z plynné fáze¹⁰. Tyto panely jsou vhodné k použití v případě nízkého požadavku na výstupní výkon jako například kapesní kalkulačky nebo hodinky. Amorfni vrstva křemíku má velmi nepravidelnou strukturu a obsahuje tedy velké množství atomů křemíku, které nemůžou navázat vazbu. Na těchto místech tak může docházet k rekombinaci náboje, a tedy k celkovému snížení účinnosti článku. Výhodou těchto článků je jejich nízká cena z důvodu použití menšího množství křemíku, hmotnost a možnost položení na zahnuté povrchy. Nevýhodou pak jejich účinnost, která se u komerčně prodávaných panelů pohybuje okolo 12 %¹¹.

V poslední době se věnuje hodně pozornosti tenkovrstvým fotovoltaickým článkům z materiálů jiných nežli křemíku, které se skládají z více různých vrstev. Tyto články se mohou dělat například z arsenidu galia (GaAs), diselenidu mědi a india (CuInSe_2) a teluridu kadmia (CdTe). Jejich účinnost je vyšší než u křemíkových článků, ale jejich výroba je nákladnější. Podstatou vícevrstvých článků je umístění tenkých vrstev z různých materiálů o různé velikosti pásma, které musí elektron přeskočit, takzvané zakázané pásmo. Jednotlivé vrstvy pak využívají různou část slunečního záření, které se skládá z fotonů o různých vlnových délkách a tedy energií, jako celek pak zpracují širší část spektra slunečního záření.¹²

Při samotné konstrukci fotovoltaického článku je nutné, aby na článek dopadalo co nejvíce světla, z tohoto důvodu se přední kontakt vyrábí jako mřížka nebo hřebínek zakrývající co nejmenší část

⁹ HASELHUHN, Ralf. Fotovoltaika: budovy jako zdroj proudu. Ostrava: HEL, 2011. ISBN 978-80-86167-33-6.

¹⁰ BENDA, Vítězslav. Výukové materiály k předmětu Elektrochemické zdroje a fotovoltaika (B1B13SEZ): Konstrukce a technologie PV článků a modulů.

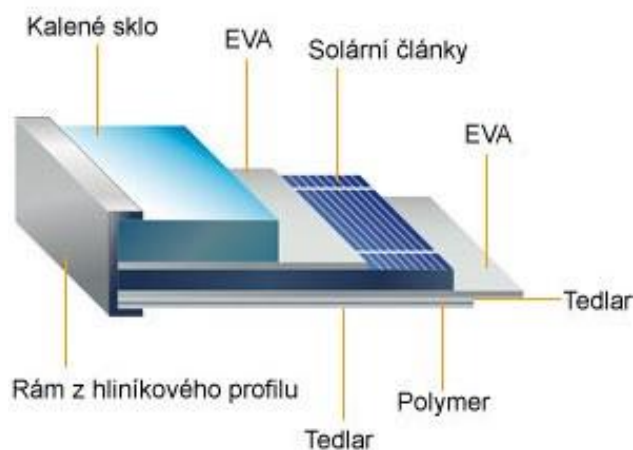
¹¹ MURTINGER, Karel, Jiří BERANOVSKÝ a Milan TOMEŠ. Fotovoltaika, elektřina ze slunce. Brno: ERA, 2007. 21. století. ISBN 978-80-7366-100-7.

¹² LIBRA, Martin a Vladislav POULEK. Fotovoltaika: teorie i praxe využití solární energie. Praha: Ilsa, 2009. ISBN 978-80-904311-0-2.

článku. Ukázkou hřebínkového kontaktu můžeme vidět na Obr. 2-4. Zadní kontakt je v případě standardních článků plný. Kontakty se mohou nanášet sítotiskem nebo vakuovým napařováním.¹³

2.1.2 Fotovoltaický panel

Fotovoltaické panely jsou tvořeny sérioparalelní kombinací článků tak, aby při definovaném osvětlení poskytovaly požadované stejnosměrné napětí. Maximální výkon těchto panelů je dán především velikostí celkové plochy panelu. Řez fotovoltaickým panelem můžeme vidět na Obr. 2-5. Při tvorbě samotného panelu se postupuje od přední strany. Začíná se pevným tvrzeným sklem, které zabraňuje mechanickému poškození článků uvnitř vlivem silného nárazu nebo krupobití. Na toto sklo je nanášena plastová EVA fólie (etylvinylacetát) a vzájemně propojené články. Přes spojené články je nanášena druhá vrstva plastové EVA fólie. Na zadní stranu se běžně pokládá laminátový kompozit, například polyvinyl flourid neboli Tedlar. Dalším krokem je vyčerpání vzduchu mezi vrstvami panelu a jeho zahřátí nad teplotu tání EVA fólie. Fólie se po zahřátí rozteče a zalije články. Posledním krokem je zarámování panelu, zatmelení panelu do hliníkových profilů a vyvedení kontaktů do svorkovnice, která zajišťuje spojení mezi vnitřní strukturou panelu s vnějším obvodem.



Obr. 2-5 Řez fotovoltaickým panelem¹⁴

2.1.3 Nosné konstrukce

Samotné fotovoltaické panely je nutné umístit na nosné konstrukce se stojanem, které zajistí správný úhel dopadu slunečního záření. Stojany pro panely se nejčastěji dělí na pevné stojany a na pohyblivé stojany. Nejčastějším materiálem pro jejich výrobu je hliník.

¹³ LIBRA, Martin a Vladislav POULEK. Fotovoltaika: teorie i praxe využití solární energie. Praha: Ilsa, 2009. ISBN 978-80-904311-0-2.

¹⁴ HQ LINE. Fotovoltaické panely | Solární a fotovoltaické panely, sluneční kolektory a elektrárny, solární systémy. Hqline [online]. c1995-2020 [cit. 2020-03-25]. Dostupné z: <https://www.hqline.com/fotovoltaicke-panely>

Při volbě pevného stojanu se zpravidla volí orientace přední strany na jih a sklon takový, aby v poledne dopadalo sluneční záření kolmo na panel a dosáhlo se tak maximální účinnosti zařízení. Sklon panelu může být pro každou FVE odlišný. Výhodou pevných stojanů je jejich jednoduchost výroby a cena.

Problematicke pohyblivých stojanů je věnováno hodně pozornosti z důvodu jejich účinnosti výroby elektrické energie. Panel totiž vyrobí nejvíce elektrické energie, pokud na něj dopadá sluneční záření kolmo, a tak je výhodou, pokud se konstrukce naklání podle úhlu dopadu slunečního záření. Nevýhodou těchto konstrukcí je jejich cena z důvodu složitosti jejich konstrukce a náročnosti údržby.¹⁵

2.2 Elektronické měniče

Výstupem všech fotovoltaických panelů je stejnosměrný proud. Aby bylo možné vyrobenou elektrickou energii jednoduše přemístit a transformovat, je nutné ji přeměnit ze stejnosměrného proudu na proud střídavý a napětí přeměnit tak, aby odpovídalo napětí ostrovní nebo rozvodné sítě. K přeměně stejnosměrného napětí a proudu na střídavý se používají střídače, které je možné rozdělit na ostrovní nebo síťové.

Ostrovní sítě uvažujeme uzavřenou lokální síť, která není nijak spojena s rozvodnou sítí. Ostrovní střídače mění podle vlastního kmitočtu, který odpovídá kmitočtu běžnému v rozvodných sítích obvykle 50/60 Hz. Tento kmitočet se volí proto aby bylo možné v ostrovní síti používat běžná zařízení.

Síťové střídače synchronizují svoje napětí i kmitočet podle rozvodné sítě, ke které jsou připojeny. Tyto měniče musí být vybaveny bezpečnostním automatickým odpojovačem od sítě, aby v případě výpadku rozvodné sítě nedodávala elektrickou energii. V opačném případě by mohlo dojít k ohrožení bezpečí pracovníků na této síti.¹⁶

Dále můžeme rozdělit střídače na transformátorové a beztransformátorové. Prvními používanými střídači byly střídače transformátorové, které obsahovaly transformátor. Transformátor ve střídači měnil napětí na potřebnou hladinu a galvanicky odděloval panely od rozvodné sítě. S postupným rozvojem výkonových polovodičů se od transformátorových střídačů ustupuje, protože jsou náročnější a dražší na výrobu. Výhodou beztransformátorových střídačů je nižší hmotnost a nižší náklady na výrobu.¹⁷

¹⁵ LIBRA, Martin a Vladislav POULEK. Fotovoltaika: teorie i praxe využití solární energie. Praha: Ilsa, 2009. ISBN 978-80-904311-0-2.

¹⁶ Tamtéž.

¹⁷ Tamtéž.

Střídače je možné umístit přímo k jednotlivým panelům, řetězcům nebo k celým fotovoltaickým polím. Podle vybraného umístění je nutné vybrat střídač o správném výkonu. Všechny střídače pro použití ve FVE jsou vybaveny obvodem, který zajišťuje elektrické přizpůsobení parametrů střídače k parametrům panelu, aby byla zajištěna největší účinnost, takzvané MPPT (Maximum Power Point Tracking). Tento obvod sleduje aktuální výkon části FVE a upravuje parametry střídače tak, aby byla ta část FVE optimálně zatěžována.¹⁸

2.3 Kabely

Fotovoltaické panely jsou vzájemně spojeny do fotovoltaických polí pomocí kabelů tak, aby na výstupu bylo požadované napětí. Všechny kabely, přítomné ve FVE, je možné rozdělit na dva základní typy podle toho, jestli vedou stejnosměrný nebo střídavý proud. Stejnosměrné kabely se vyskytují mezi jednotlivými články, panely a vedou až ke střídači. Tyto kabely musí být dimenzovány tak, aby odolaly proudovému, napěťovému a výkonovému zatížení. U kabelů vedoucích stejnosměrný proud, musíme rozlišovat polaritu napětí a při jejich spojování nesmí dojít k záměně. Výstup ze střídače vede až k rozvaděči, z kterého je vyveden výstup do DS nebo vlastní spotřeby elektrárny. Tyto kabely na střídavý proud musí být dimenzovány podle měniče.

2.4 Transformátor

Transformátor je elektrický netočivý stroj, který slouží k přeměně hladiny střídavého napětí na hladinu jinou pomocí elektromagnetické indukce. Pro účely FVE se používají transformátory pro zvýšení hladiny napětí ze střídače na hladinu napětí sítě vlastní spotřeby a DS. Nejčastěji se používají amorfní transformátory, které mají magnetické jádro složené z amorfních plechů. Amorfní transformátory se vyznačují vysokou výrobní cenou, ale nižšími ztrátami naprázdno, které mohou být až o 50 % menší než u běžných transformátorů.¹⁹

2.5 Odpínání a jištění

Největším problémem jištění stejnosměrné části FVE je jištění samotných článků mezi sebou. Pokud dojde k zastínění celého panelu nebo jeho části, tak se z něho stává odporová zátěž zatěžující celý propojený řetězec a dochází ke zvýšení rizika poruchy vlivem oteplení, které je způsobeno průchodem většího proudu, a tedy větších ztrát. Tento problém není možné odstranit pojistkami, protože proud procházející fotovoltaickým panelem, který se chová jako zátěž není

¹⁸ LEONICS. Basics of Maximum Power Point Tracking (MPPT) Solar Charge Controller. Leonics [online]. c2019 [cit. 2020-03-25]. Dostupné z: http://www.leonics.com/support/article2_14j/articles2_14j_en.php

¹⁹ POWER-ENERGO. AMORFNÍ transformátory - ABB - Produkty. Power-Energo [online]. [cit. 2020-03-25]. Dostupné z: <https://www.power-energo.cz/produkty/amorfní-transformatory-abb.html>

o moc větší než jmenovitý, a tedy by nikdy nedošlo k přepálení pojistky. Tento problém se řeší pomocí tzv. bypass diod, které v případě zastínění části panelu poskytují proudovou cestu místo zastíněnou část. V ideálním případě by byla bypass dioda umístěna paralelně ke každému článku, ale z ekonomických důvodů se umísťuje k větším skupinám článků, protože použití u jednotlivých článků by bylo příliš nákladné.

Další vrstva jistění je tvořena pomocí blokovacích diod, které se umísťují ke každé sériové větvi článků. Tyto diody blokují proud v opačném směru a zabraňují tak průchodu proudu od ostatních větví v případě zastínění větve.²⁰

Parametry jisticích přístrojů pro stejnosměrnou stranu fotovoltaického zdroje vycházejí z výsledného zapojení fotovoltaických panelů a jejich vlastností. Pro jmenovité napětí jisticích přístrojů platí:

$$U_n \geq 1,2 * U_0 * NS \quad [V;V,-] \quad (1)$$

kde U_n je jmenovité napětí jisticího přístroje, U_0 napětí fotovoltaického panelu naprázdno a NS počet fotovoltaických panelů v sérii. Činitel 1,2 bere v úvahu nárůst napětí při nízkých teplotách, výrobní tolerance panelů apod.²¹

Odpínače se u FVE umísťují k jednotlivým řetězcům a dále také k celému poli. Tyto odpínače pracují s proměnlivým stejnosměrným proudem, který je oproti střídavému proudu náchylnější k tvorbě elektrického oblouku. Musí tedy být schopné odpojit malé i velké proudy při vysokém napětí a zhaset oblouky. Pro přenos vysokého stejnosměrného napětí, vyskytujícího se ve fotovoltaických elektrárnách, se používají více pólové pojistky, které mají kontakty spojeny do série.²²

Pro zajištění bezpečné údržby střídače je nutné umístit odpínač i na střídavou stranu FVE tak, aby bylo možné odpojit pouze střídač z obou stran. Tento odpínač se nejčastěji umísťuje před rozvaděč a musí být schopen vypnout střídavý obvod i při maximálním výkonu FVE. Za rozvaděč se umísťuje hlavní odpínač, který dokáže odpojit celou FVE i s vlastní spotřebou od DS.²³

²⁰ ASPENCORE. Bypass Diodes in Solar Panels and Arrays. In: ElectronicsTutorials [online]. AspenCore, c2020 [cit. 2020-03-25]. Dostupné z: <https://www.electronics-tutorials.ws/diode/bypass-diodes.html>

²¹ JURAJDA, Pavel. Ochranné a spínací přístroje FV zdrojů. *Elektro*. 2010, (2), 32-33.

²² KOCANDA, Tomáš. Odpínání a jistění DC rozvodů fotovoltaických elektráren. *Solar Technika* [online]. Webmax, 2008 [cit. 2020-03-25]. Dostupné z: <http://www.solartechnika.sk/solartechnika-22010/odpinani-a-jisteni-dc-rozvodu-fotovoltaickych-elektren.html>

²³ JURAJDA, Pavel. Ochranné a spínací přístroje FV zdrojů. *Elektro*. 2010, (2), 32-33.

Pro ochranění všech důležitých částí elektrárny před atmosférickými a spínacími vlivy se používají svodiče přepětí, které se umísťují vždy k zařízení, které chrání. V případě, kdy jsou fotovoltaické panely vzdáleny od střídače je vhodné umístit svodič přepětí k panelu i střídači.²⁴

2.6 Měření

Měření elektřiny se provádí před rozvaděčem pro měření celkové vyrobené elektřiny a za rozvaděčem pro měření celkové elektřiny dodané do DS. Tyto hodnoty se budou lišit o odběr výkonu pro vlastní spotřebu, která je vyvedena z rozvaděče. Měřené veličiny a specifikace přístrojů jsou udávány vyhláškou MPO č. 82/2011 Sb.²⁵

2.7 Rozvaděč

Rozvaděčem rozumíme skříň, která obsahuje měřicí přístroje, jištění a ovládání elektroinstalace, která je do něj zapojena. V případě FVE je do rozvaděče přiveden výstup ze střídače, který je zde jištěn a měřen. Dále v něm mohou být udělány odbočky na vlastní spotřebu a měření výstupu do DS. Rozvaděč funguje jako ochrana jednotlivých přístrojů před vnějšími vlivy.

²⁴ JURAJDA, Pavel. Ochranné a spínací přístroje FV zdrojů. *Elektro*. 2010, (2), 32-33.

²⁵ ČESKÁ REPUBLIKA. Vyhláška o měření elektřiny a o způsobu stanovení náhrady škody při neoprávněném odběru, neoprávněné dodávce, neoprávněném přenosu nebo neoprávněné distribuci elektřiny. In: *Sbírka zákonů*. 2011, 31/2011.

3 Podmínky připojení

Každá výrobní elektrárna připojená do DS nebo PS musí splňovat technické a administrativní požadavky, které stanovuje Energetický zákon č. 458/2000 Sb. o podmínkách podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích a o změně některých zákonů a nařízení Evropského parlamentu 2016/631, kterým se stanoví kodex sítě pro požadavky na připojení výroben k elektrizační soustavě. Požadavky stanovené ERÚ se nachází v Pravidlech provozování distribuční soustavy (PPDS) a nařízení Evropského parlamentu v Úředním věstníku Evropské unie.

Přenosová soustava (PS) v České republice zajišťuje přenos elektrické energie na napětíových hladinách 400 kV, 220 kV a provoz 43 rozvodných stanic. Dále PS zprostředkovává propojení v rámci Evropské unie. Výhradním provozovatelem PS v České republice je na základě licence udělené ERÚ ČEPS, a.s.²⁶

Distribuční soustavou (DS) v České republice rozumíme vzájemně propojený soubor elektrického vedení na hladině napětí do 110 kV včetně. V případě FVE se dále budeme zabývat pouze DS, neboť do PS nejsou žádné připojeny. V České republice máme tři provozovatele distribuční soustavy (PDS):

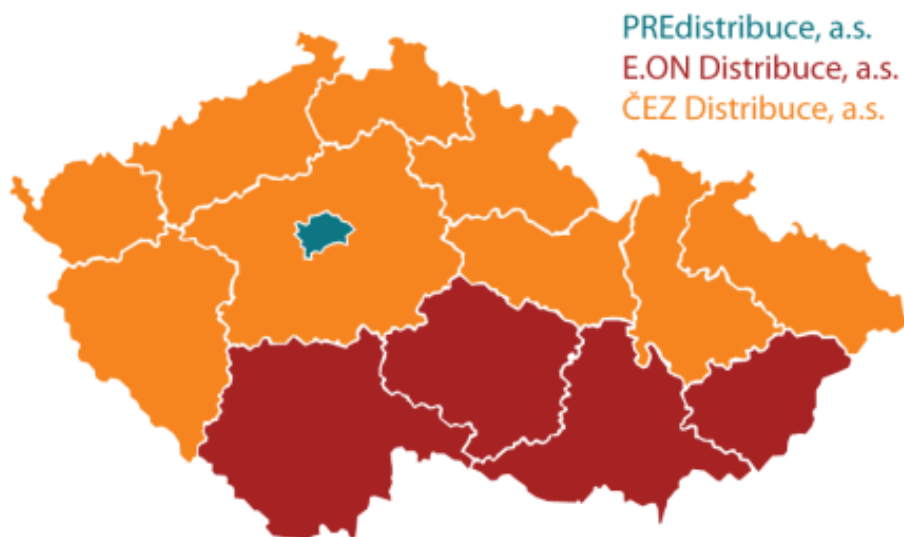
ČEZ Distribuce, a.s., jež je dceřinou společností energetické firmy ČEZ, a.s.

PREdistribuce, a.s., který je PDS na území hlavního města Prahy

E.ON Distribuce, a.s., která je PDS v jižních Čechách a na jižní Moravě

Tyto subjekty mají Českou republiku rozdělenou do oblastí dle Obr. 3-1

²⁶ ČEPS [online]. Praha [cit. 2020-03-25]. Dostupné z: <https://www.ceps.cz/>



Obr. 3-1 Rozdělení působnosti PDS v České republice²⁷

3.1 Technické konzultace

Na základě žádosti o připojení k DS poskytne PDS seznam informací o požadavcích a podmínkách k připojení výroby elektřiny do DS. Jedná se pouze o orientační informace a nejsou předmětem k použití pro účely územního a stavebního řízení.²⁸

3.2 Žádost o připojení

Tato žádost se předkládá v případě připojení nově, rozšíření stávající nebo rekonstrukce stávající výroby elektřiny. Součástí žádosti o připojení je povinnost předložit následující dokumenty:²⁹

- Katastrální mapa s vyznačením pozemku, na kterém bude výroba umístěna.
- Výpis z obchodního rejstříku nebo živnostenský list.
- Dotazník pro vlastní výrobu.
- Výpis z katastru nemovitostí.
- Souhlas vlastníků nemovitostí, v případě, že žadatel není vlastníkem pozemku.
- Stávající a požadovaná hodnota rezervovaného výkonu a příkonu při všech provozních stavech.

²⁷ TZB-INFO. Jak zjistím ke které distribuční soustavě elektřiny patřím. Tzb-info [online]. c2001-2020 [cit. 2020-03-25]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/ceny-paliv-a-energie/211-jak-zjistim-ke-ktere-distribucni-soustave-elektřiny-patrim-a-mohu-si-zvolit-jinou>

²⁸ PROVOZOVATELÉ DISTRIBUČNÍCH SOUSTAV. Pravidla pro paralelní provoz výroben a akumulčních zařízení se sítě: Příloha 4. [online] dostupné z: https://www.cezdistribuce.cz/edee/content/file-other/distribuce/energeticka-legislativa/ppds/ppds-2017_priloha-4.pdf, 2018, 78 s.

²⁹ Tamtéž.

3.3 Posouzení žádosti o připojení

Po obdržení žádosti je ve lhůtě stanovené ve vyhlášce č. 16/2016 Sb. o podmínkách připojení k elektrizační soustavě, ve znění pozdějších předpisů³⁰, rozhodnuto, zda je připojení možné s ohledem na:

- Rezervovaný výkon u předávacího místa mezi DS a PS a limitem připojitelného výkonu stanoveným PDS.
- Volnou distribuční kapacitu na úrovni transformování 110 kV.
- Studii připojitelnosti.

Při kladném rozhodnutí o žádosti o připojení výrobní je žadateli zaslán návrh smlouvy.³¹

3.4 Studie připojitelnosti výrobní

Předložená studie připojitelnosti výrobní musí obsahovat technické posouzení připojitelnosti výrobní s ohledem na:

- Napěťové poměry v posouzených uzlech DS.
- Možnou zatížitelnost individuálních prvků sítě.
- Dodržení limitů zpětných vlivů na síť, zejména hladiny napětí při trvalém provozu výrobní, změny hladiny napětí vlivem spínání, tlumení signálu hromadného dálkového ovládání (HDO), flickr a zatížení vyššími harmonickými.
- Dodržení požadavků podpory sítě při poklesech napětí, aby došlo k zamezení nežádoucího odpojení výroben elektřiny a rozpadu sítě.

Náklady na zpracování studie připojitelnosti hradí žadatel. Posouzení studie se provádí postupy uvedenými v podnikové normě PNE 33 3430-0³² se záměrem dosažení co nejmenších zpětných vlivů na DS při určeném provozním režimu všech zařízení. V případě pochybnosti o správnosti nebo neúplnosti předložené studie může PDS požadovat její doplnění, opravu nebo studii zamítnout jako neodpovídající.

PDS má právo si vyžádat kopie všech dokumentů podle kterých zhotovitel studie čerpal a prováděl výpočty. V případě nedodání kopií potřebných dokumentů může být studie zamítnuta z důvodu věrohodnosti.

³⁰ ČESKÁ REPUBLIKA. Vyhláška o podmínkách připojení k elektrizační soustavě. In: *Sbírka zákonů*. 2016, 16/2016.

³¹ Tamtéž.

³² PNE 33 3430-0. Výpočetní hodnocení zpětných vlivů odběratelů a zdrojů distribučních soustav. 4.vyd. Energetické společnosti, 2009.

Studie pro připojení výroben do NN a VN se zpravidla skládá ze stanice transformátoru, který napájí síť, vedením mezi výrobnou a bodem připojení do DS. Obsahem posouzení jsou provozní stavy definované PDS, případné přetoky do jiných napěťových hladin a jejich vliv na regulaci napětí transformátorů.

Potřebné výpočty zatížení sítě jsou prováděny pro letní provoz při minimálním zatížení a pro zimní provoz při maximálním zatížení. Povinnost zpracovatele studie je dokázat schopnost připojené výrobní pracovat v těchto stavech.³³

3.5 Projektová dokumentace

Obsahem projektové dokumentace předložené k odsouhlasení PDS musí být tyto základní dokumenty:

- Popis použitých vedení, včetně průřezu a délky, mezi výrobnou a místem připojení k DS.
- Parametry použitých transformátorů.
- Parametry a nastavení hodnot elektrických ochranných.
- Provedení řízení činného a jalového výkonu.
- Popis zařízení na snížení útlumu HDO v případě překročení limitů povolených PPDS nebo technickými normami.
- Návrh provedení měření pro fakturaci a jeho umístění.
- Parametry rozhraní pro dálkové ovládání, měření a signalizaci pro vazbu na řídicí systém DS.
- Zařazení elektrického zařízení do příslušných tříd a skupin dle vyhlášky č. 73/2010 Sb. o stanovení vyhrazených elektrických technických zařízení, jejich zařazení do tříd a skupin a o bližších podmínkách jejich bezpečnosti.
- Popis funkce ochranných a automatizace výrobní pro provoz a dynamickou podporu DS.

Vyjádření k projektové dokumentaci bude vystaveno do třiceti dnů od jeho podání. Součástí tohoto vyjádření bude požadavek na předložení zprávy o výchozí revizi výrobní elektrické energie, jejího připojení k DS, místních předpisů provozu a ochranných souvisejících s DS.

³³ PROVOZOVATELÉ DISTRIBUČNÍCH SOUSTAV. Pravidla pro paralelní provoz výroben a akumulčních zařízení se sítí: Příloha 4. [online] dostupné z: https://www.cezdistribuce.cz/edee/content/file-other/distribuce/energeticka-legislativa/ppds/ppds-2017_priloha-4.pdf, 2018, 78 s.

V případě předložení neúplné projektové dokumentace je žadatel obeznámen a je mu umožněno si projektovou dokumentaci vyzvednout a doplnit. Pokud není stanoveno jinak, tak se projektová dokumentace předává vždy v tištěné formě.³⁴

3.6 Připojení k síti

Výrobní nově připojené do DS musí být vybavené pro instalaci dálkového ovládní. Součástí tohoto vybavení musí být spínací místo s oddělovací funkcí, které pro jednofázové výrobní do 3,7 kVA a trojfázové výrobní do 30 kVA obsahuje zařízení pro sledování stavu sítě s přiřazeným spínacím prvkem. Výrobní s výkonem do 100 kVA musí být vybaveny spínacím místem s dálkovým ovládním a signalizací stavu.

Způsob, místo a napětovou hladinu připojení včetně rezervovaného výkonu stanoví PDS podle současného stavu sítě. Možnost připojení je posouzena vzhledem ke zkratovému výkonu v místě připojení, výkonu připojované výrobní a způsobu provozu výrobní. Výrobní je obecně možné připojit přímo k DS, v odběrovém místě nebo v předávacím místě jiné výrobní.³⁵

3.7 Dálkové řízení

Výrobní s výkonem nad 100 kVA mají povinnost se připojit do dálkového řízení PDS. Tyto výrobní musí být možné na dálku odpojit, připojit a regulovat jejich činný a jalový výkon. V případě výroben připojených do VN a 110 kV se zpracovávané informace zpravidla skládají z³⁶:

- Údajů o přítomných řídicích zařízeních.
- Stavech přítomných řídicích zařízeních.
- Zadané hodnoty napětí a účinníku.
- Činného a jalového výkonu.
- Přenosu dat z měřicích přístrojů.
- Sdruženého signálu o působení ochran.

³⁴ PROVOZOVATELÉ DISTRIBUČNÍCH SOUSTAV. Pravidla pro paralelní provoz výroben a akumulačních zařízeních se sítí: Příloha 4. [online] dostupné z: https://www.cezdistribuce.cz/edee/content/file-other/distribuce/energeticka-legislativa/ppds/ppds-2017_priloha-4.pdf, 2018, 78 s.

³⁵ Tamtéž.

³⁶ PROVOZOVATELÉ DISTRIBUČNÍCH SOUSTAV. Pravidla pro paralelní provoz výroben a akumulačních zařízeních se sítí: Příloha 4. [online] dostupné z: https://www.cezdistribuce.cz/edee/content/file-other/distribuce/energeticka-legislativa/ppds/ppds-2017_priloha-4.pdf, 2018, 78 s.

4 Chování nesynchronní výroby v síti VN

Nesynchronní výrobnou rozumíme výrobu elektrické energie, která je připojena nesynchronně nebo pomocí výkonového měniče. Mezi nesynchronní výroby patří hlavně FVE a větrné elektrárny. Každá nesynchronní výroba elektrické energie připojená paralelně do DS musí splňovat požadavky pro bezpečný provoz soustavy. Tyto požadavky jsou obecně stanoveny v Nařízení komise (EU) 2016/631 (RfG) a pro Českou republiku upřesněny v Pravidlech provozování distribuční soustavy příloze č. 4. Pro potřeby tohoto nařízení byly výrobní moduly (VM) v České republice rozděleny dle hranice instalovaného výkonu do následujících kategorií:

Tabulka 1 Rozdělení VM do kategorií³⁷

Kategorie VM	Podkategorie VM	Hranice instalovaného výkonu
A	A1	nad 800 W
		do 11 kW vč.
	A2	nad 11 kW
		do 100 kW
B	B2	nad 100 kW vč.
		do 1 MW
B	B1	nad 1 MW vč.
		do 30 MW
C	C	nad 30 MW vč.
		do 75 MW
D	D	nad 75 MW vč.

Mikrogenerátory do 800 W nemají vlastní kategorii a řídí se dle ČSN EN 50 438³⁸. Mikrogenerátory se připojují pouze do distribuční sítě NN. Nebudeme se jimi tedy dále zabývat.

³⁷ PROVOZOVATELÉ DISTRIBUČNÍCH SOUSTAV. Pravidla pro paralelní provoz výroben a akumulačních zařízení se sítí: Příloha 4. [online] dostupné z: https://www.cezdistribuce.cz/edec/content/file-other/distribuce/energeticka-legislativa/ppds/ppds-2017_priloha-4.pdf, 2018, 78 s..

³⁸ ČSN EN 50 438. Požadavky na paralelní připojení mikrogenerátorů s veřejnými distribučními sítěmi nízkého napětí. ED.2. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.

4.1 Frekvenční rozsah

Frekvence sítě v České republice je 50 Hz, tato hodnota však dynamicky klesá či roste z důvodu nedostatku, respektive přebytku elektrické energie k aktuální poptávce. Aby nedošlo k náhlému odpojení VM v případě změny frekvence a tím možnému následnému rozpadu sítě, stanovuje RfG dobu, při které musí zůstat VM při určité frekvenci připojeny. Pro Českou republiku platí tyto hodnoty, schválené ERÚ:

Rozsah frekvence	Doba, po kterou musí být výrobná připojena
47 – 47,5 Hz	20 s
47,5 – 48,5 Hz	30 min
48,5 – 49 Hz	90 min
49 – 51 Hz	neomezeně
51 – 51,5 Hz	30 min

Tabulka 2 Frekvenční rozsah výroben³⁹

VM musí zůstat připojeny i v případě časové změny frekvence ± 2 Hz/s, kde tato změna je měřena jako střední hodnota derivace frekvence za časový interval 500 ms⁴⁰.

4.2 Napěťový rozsah

Hladina napětí v DS má stejně jako v případě frekvence stanovenou jmenovitou hodnotu, při které musí připojené zařízení pracovat. V České republice se používají v DS hladiny VN 3, 6, 10, 22, 35 kV. V současné době se hladiny napětí 3, 6, 10 kV již nerozšiřují a v rámci rekonstrukcí se předělávají na normalizované napětí 22 a 35 kV⁴¹. Aktuální hodnota napětí, ale stejně jako v případě frekvence, není stálá a dynamicky se s časem mění. Aby nedocházelo k náhlému odpojení výroben, musí zůstat po určitou dobu připojeny i při změně napětí. Rozsahy napětí jsou uvedeny v poměrných jednotkách (p. j.), aby je bylo možné aplikovat pro všechny hladiny napětí.

³⁹ PROVOZOVATELÉ DISTRIBUTIVNÍCH SOUSTAV. Pravidla pro paralelní provoz výroben a akumulačních zařízení se sítí: Příloha 4. [online] dostupné z: https://www.cezdistribuce.cz/edee/content/file-other/distribuce/energeticka-legislativa/ppds/ppds-2017_priloha-4.pdf, 2018, 78 s.

⁴⁰ NAŘÍZENÍ KOMISE (EU) 2016/631 ze dne 14. dubna 2016, kterým se stanoví kodex sítě pro požadavky na připojení výroben k elektrizační soustavě. 2016.

⁴¹ VÁPENÍK, René. Elektrovue Regulace napětí v distribuční soustavě vn a nn. 2011, 13(3). ISSN 1213-1539

Rozsah napětí	Doba provozu
0,85 p. j. – 0,90 p. j.	60 minut
0,90 p. j. – 1,118 p. j.	neomezená
1,118 p. j. – 1,15 p. j.	60 minut

Tabulka 3 Rozsah napětí pro výrobní připojené do sítě VN⁴²

4.3 Podpora sítě

Všechna VM připojená do DS se musejí dle RfG⁴³ podílet na jejím bezpečném provozu. Mezi tyto podpory patří například podpora napětí, překlenutí poruch při abnormálních stavech sítě nebo regulace dodávaného činného výkonu.

4.3.1 Statická podpora napětí

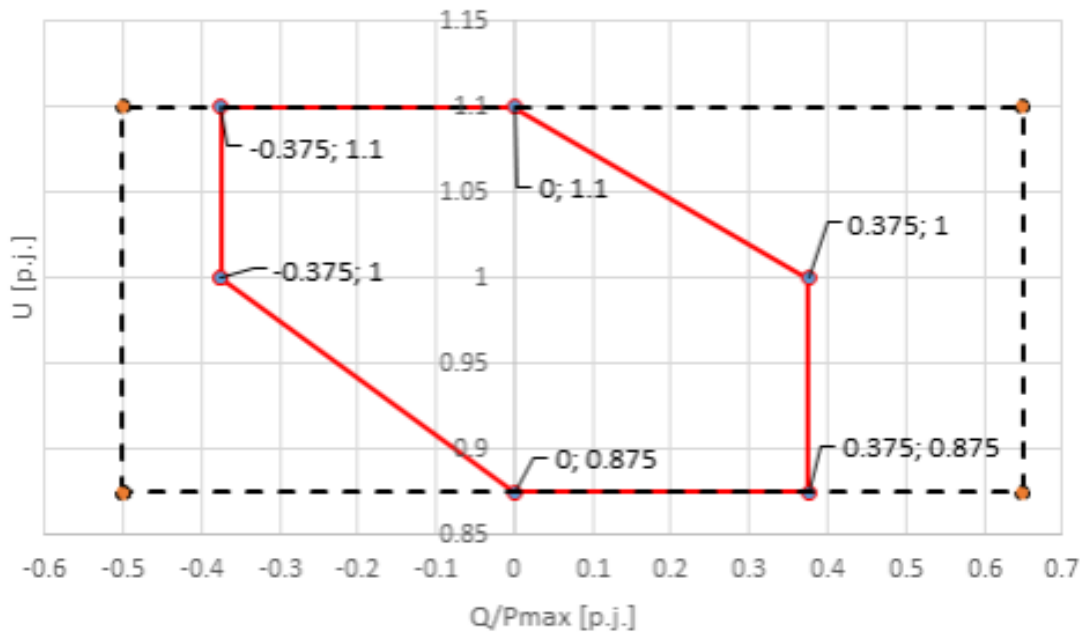
Statická podpora napětí znamená udržení napětí v mezích daných ve smlouvě během normálního provozu při pomalých změnách napětí. Tato podpora je prováděna dodáním nebo odběrem jalového výkonu.

Nesynchronní VM kategorie B2, C, D, připojené do DS VN, musí být schopny dodávat dodatečný jalový výkon, kterým se kompenzuje nabíjecí výkon nadzemního vedení nebo kabelu mezi výkonovým měničem a místem připojení. Při maximálním dodávaném činném výkonu musí VM pracovat v rámci diagramu na Obr. 4-1⁴⁴.

⁴² PROVOZOVATELÉ DISTRIBUČNÍCH SOUSTAV. Pravidla pro paralelní provoz výroben a akumulačních zařízení se sítí: Příloha 4. [online] dostupné z: https://www.cezdistribuce.cz/edee/content/file-other/distribuce/energeticka-legislativa/ppds/ppds-2017_priloha-4.pdf, 2018, 78 s.

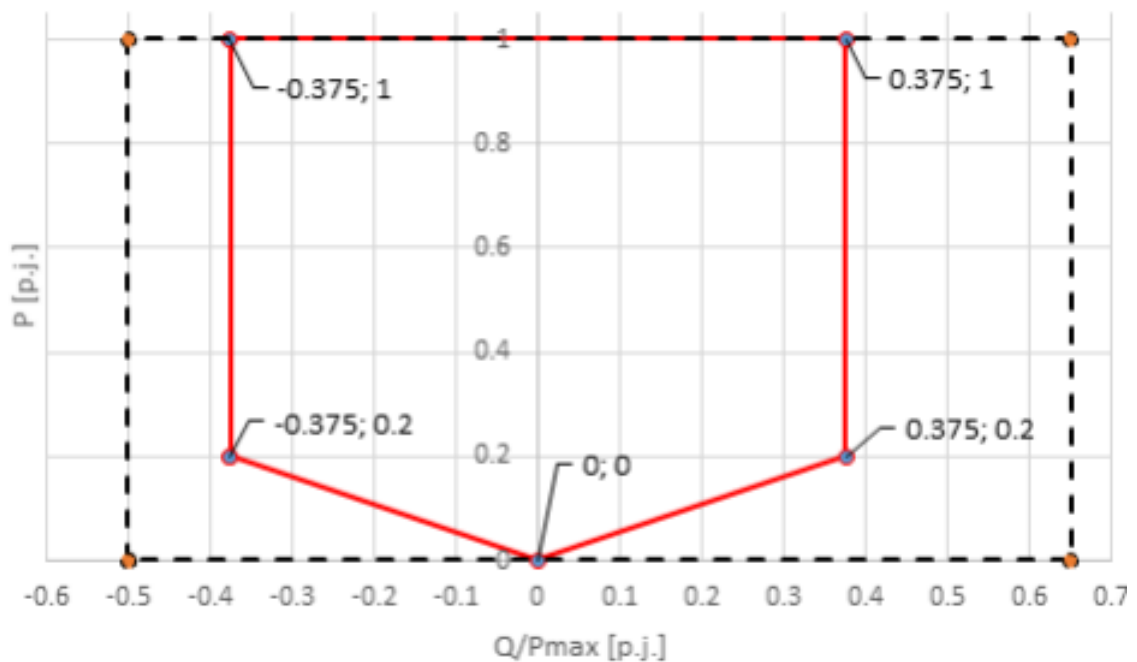
⁴³ NAŘÍZENÍ KOMISE (EU) 2016/631 ze dne 14. dubna 2016, kterým se stanoví kodex sítě pro požadavky na připojení výroben k elektrizační soustavě. 2016.

⁴⁴ PROVOZOVATELÉ DISTRIBUČNÍCH SOUSTAV. Pravidla pro paralelní provoz výroben a akumulačních zařízení se sítí: Příloha 4. [online] dostupné z: https://www.cezdistribuce.cz/edee/content/file-other/distribuce/energeticka-legislativa/ppds/ppds-2017_priloha-4.pdf, 2018, 78 s.



Obr. 4-1 Dodávka/odběr Q při maximální dodávce P^{45}

Při sníženém výkonu musí VM pracovat v rámci diagramu na Obr. 4-2. V případě nedostupnosti všech bloků je schopnost dodání činného a jalového výkonu úměrně nižší.



Obr. 4-2 Dodávka/odběr Q při nižší než maximální dodávce P^{46}

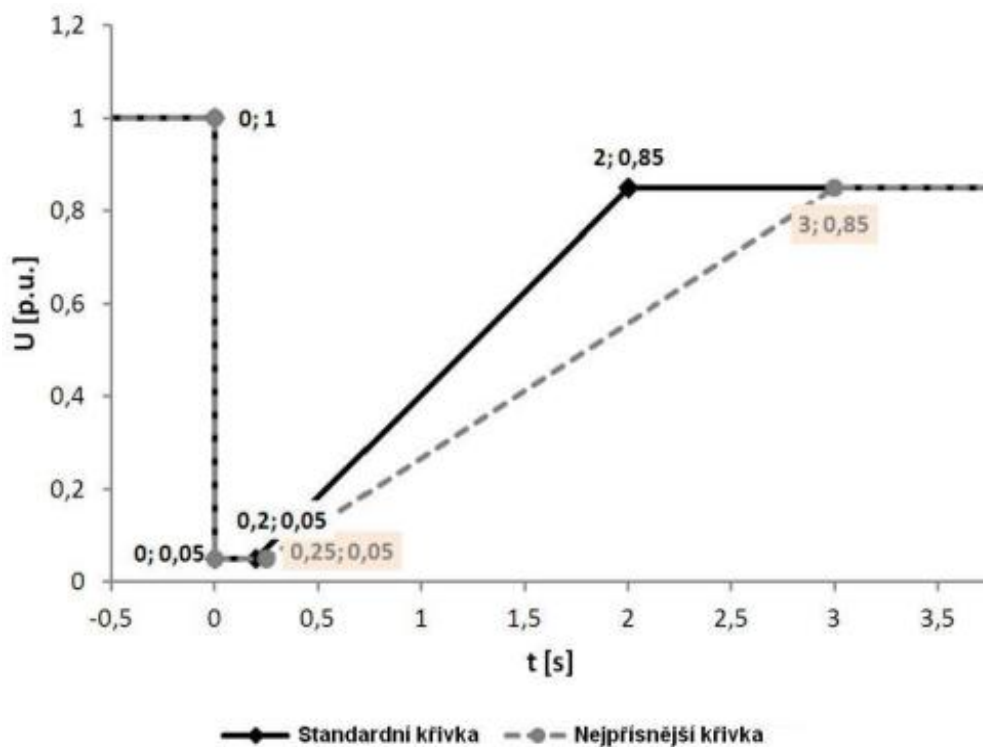
⁴⁵ PROVOZOVATELÉ DISTRIBUČNÍCH SOUSTAV. Pravidla pro paralelní provoz výroben a akumulačních zařízení se sítí: Příloha 4. [online] dostupné z: https://www.cezdistribuce.cz/edee/content/file-other/distribuce/energeticka-legislativa/ppds/ppds-2017_priloha-4.pdf, 2018, 78 s.

⁴⁶ PROVOZOVATELÉ DISTRIBUČNÍCH SOUSTAV. Pravidla pro paralelní provoz výroben a akumulačních zařízení se sítí: Příloha 4. [online] dostupné z: https://www.cezdistribuce.cz/edee/content/file-other/distribuce/energeticka-legislativa/ppds/ppds-2017_priloha-4.pdf, 2018, 78 s.

Změny jalového výkonu musí proběhnout na 90% žádané hodnoty do 4 sekund od zadání a do 30 sekund se musí ustálit.⁴⁷

4.3.2 Dynamická podpora sítě

Zkrat v ES znamená vodivé spojení mezi dvěma nebo více vodivými částmi, které způsobí, že rozdíl potenciálů těchto vodivých částí je roven nule.⁴⁸ V případě zkratu v síti velmi vysokého a zvláště vysokého napětí, tak může dojít k rychlému poklesu napětí v sítích, které jsou z ní napájeny. Aby nedošlo k rozpadu sítě vlivem odpojení mnoha VM při poklesu napětí, musí VM po určitou dobu zůstat připojeny i v případě rychlých změn napětí. Standardní a nejpřísnější křivka určující požadavky VM připojených se střídačem jsou na Obr. 4-3.



Obr. 4-3 Schopnost překonání poruchy pro VM se střídačem⁴⁹

V případě přepětí musí být VM připojeny po dobu 1 sekundy v případě 120 % dohodnutého napětí a 60 sekund v případě 115 % dohodnutého napětí.

⁴⁷ NAŘÍZENÍ KOMISE (EU) 2016/631 ze dne 14. dubna 2016, kterým se stanoví kodex sítě pro požadavky na připojení výroben k elektrizační soustavě. 2016.

⁴⁸ ŠVEC, Jan. Výukové materiály k předmětu Elektroenergetika 1 (B1B15EN1): Zkraty v ES.

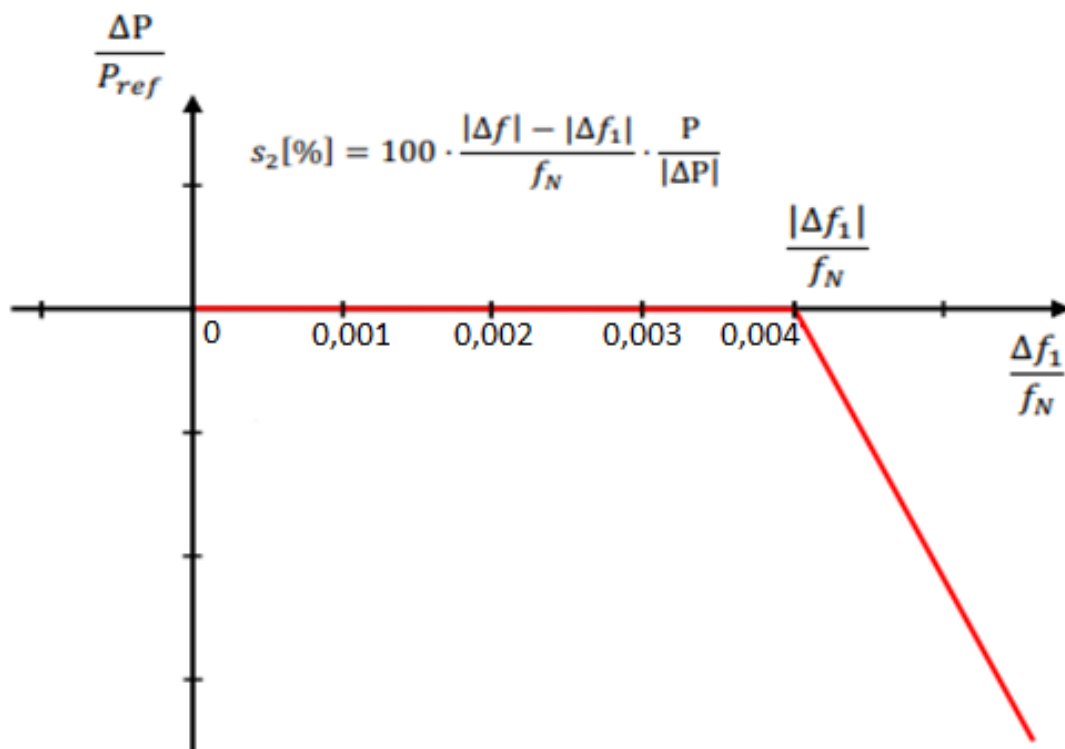
⁴⁹ PROVOZOVATELÉ DISTRIBUČNÍCH SOUSTAV. Pravidla pro paralelní provoz výroben a akumulačních zařízení se sítí: Příloha 4. [online] dostupné z: https://www.cezdistribuce.cz/edee/content/file-other/distribuce/energeticka-legislativa/ppds/ppds-2017_priloha-4.pdf, 2018, 78 s.

Nesynchronní VM kategorie B1, B2, C a D musí být schopny při symetrických poruchách dodávat zkratový proud, a to zajištěním dodávky zkratového proudu v místě připojení v případě potřeby. Další možností je vlastní systém na rozpoznání poruchy, který měří odchylky napětí na svorkách jednotlivých bloků VM.

Pro velké VM kategorie C a D platí schopnost ostrovního provozu, při kterém musí být výrobní schopna pracovat dle frekvenčních a napěťových limitů popsaných v kapitolách 4.1 a 4.2. Během práce v ostrovním provozu musí být VM schopen snížit svůj výkon alespoň na 55 % své kapacity.⁵⁰

4.3.3 Regulace činného výkonu

Každý VM připojený do DS musí být schopen regulovat výstupní činný výkon, aby mohl pomáhat v udržování výkonové bilance, a tedy frekvence v síti. Při nadfrekvenci je nutné činný výkon snížit dle Obr. 4-4. Tato regulace se aktivuje dle zadané prahové frekvence a statiky. Statikou rozumíme poměrnou změnu frekvence. V České republice jsou základní nastavení prahové frekvence 50,2 Hz a statiky 5 %.



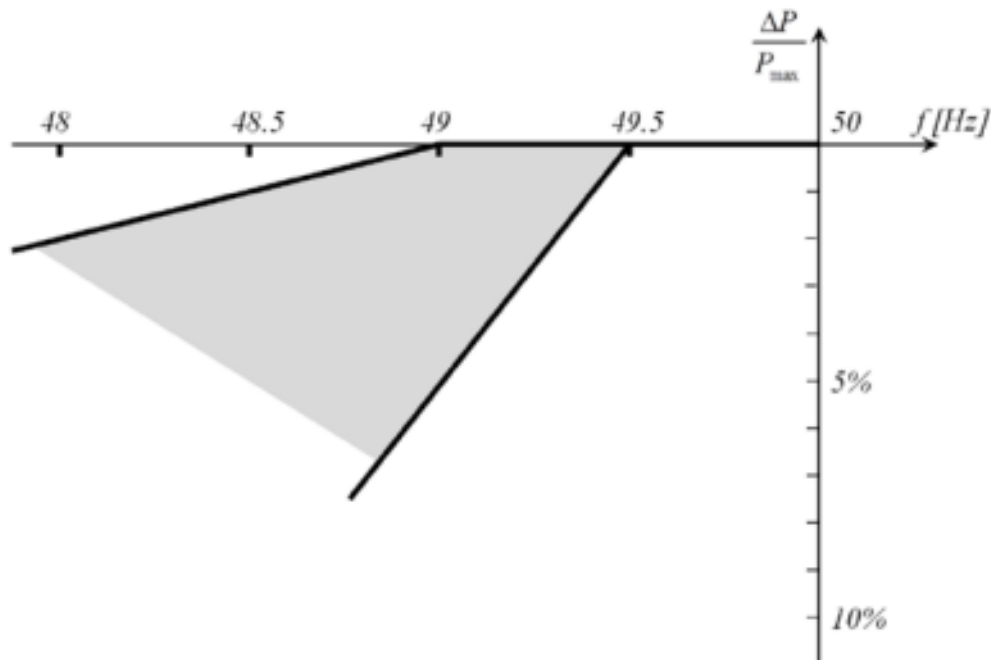
Obr. 4-4 Snížení činného výkonu při nadfrekvenci⁵¹

⁵⁰ PROVOZOVATELÉ DISTRIBUČNÍCH SOUSTAV. Pravidla pro paralelní provoz výroben a akumulčních zařízení se sítí: Příloha 4. [online] dostupné z: https://www.cezdistribuce.cz/edec/content/file-other/distribuce/energeticka-legislativa/ppds/ppds-2017_priloha-4.pdf, 2018, 78 s.

⁵¹ Tamtéž.

P_{ref} je činný výkon na výstupu při dosažení prahové frekvence Δf_1 . Δf odchylka frekvence v soustavě, ΔP změna činného výkonu, f_N jmenovitá frekvence sítě a s_2 statika.

Snižování činného výkonu při podfrekvenci je umožněno pouze dle rozsahu uvedeném na Obr. 4-5.



Obr. 4-5 Rozsah snížení výkonu při podfrekvenci⁵²

4.3.4 Automatické připojení výroben

Opětovné automatické připojení výroben je umožněno pouze VM kategorie A1, A2, B1, B2 a C za následujících podmínek:

- Výstupní činný výkon není PDS omezen na 0 %.
- Napětí je po dobu 5 minut v rozmezí 85–110 % Jmenovité hodnoty.
- Frekvence je po dobu 5 minut v rozmezí 47,5 - 50,05 Hz.
- Výrobna je schopna postupně zvyšovat výstupní výkon s rychlostí maximálně 10 % jmenovitého výkonu za minutu, v opačném případě se výrobna připojí po intervalu určeném PDS.

VM kategorie D se mohou opětovně připojit pouze na pokyn dispečera PDS⁵³.

⁵² PROVOZOVATELÉ DISTRIBUČNÍCH SOUSTAV. Pravidla pro paralelní provoz výroben a akumulčních zařízení se sítě: Příloha 4. [online] dostupné z: https://www.cezdistribuce.cz/edec/content/file-other/distribuce/energeticka-legislativa/ppds/ppds-2017_priloha-4.pdf, 2018, 78 s.

⁵³ Tamtéž.

5 Zpětné vlivy na napájecí síť

S rostoucím podílem decentrálních výroben a FVE začínáme pozorovat negativní vlivy těchto výroben, které v jisté míře ovlivňují ostatní provozovatele a odběratele elektrické energie. Pro tyto vlivy je nutné stanovit jejich maximální přípustné hodnoty, podle kterých můžeme jednotlivé výroby posuzovat. Z tohoto důvodu vznikla podniková norma PNE 33 3430⁵⁴, která stanoví postup výpočtu vlivů a jejich maximální hodnoty.

5.1 Změna napětí

Při normálních provozních podmínkách nesmí provoz výroby zvýšit napětí v přípojném bodě o více než 2 % ve srovnání s napětím v přípojném bodě bez připojené výroby.

Maximální výstupní napětí panelu je určeno sérioparalelní kombinací jednotlivých článků tohoto panelu a jeho aktuální hodnota je závislá na aktuálním slunečním svitu, které dopadá na část nebo celý panel. Z tohoto důvodu se výstupní napětí v průběhu dne dynamicky mění. Dynamická změna napětí se posuzuje dle takzvaného flickru v místě připojení do DS. Flicker (z anglického flicker = blikat) můžeme považovat jako pozorovatelné blikání způsobené změnou napětí. Pro posouzení výroben z hlediska dynamických změn napětí se využívá dlouhodobé míry vjemu flickru P_{lt} , který vychází z měření krátkodobého flickru P_{st} . Tuto hodnotu získáme měřením relativních změn napětí v 10minutových intervalech, přičemž P_{lt} se nejčastěji odvozuje z dvanácti po sobě jdoucích skupin P_{st} .⁵⁵

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} P_{sti}^3} \quad [\text{W}; \text{W}] \quad (2)$$

Pro napájecí bod v DS je pak stanovena maximální hodnota P_{lt} :

$$P_{lt} \leq 0,46 \quad [\text{W}]. \quad (3)$$

5.2 Proudů vyšších harmonických

Podstata vyšších harmonických je založena na skutečnosti, že každý periodicky se opakující průběh lze rozložit na součet sinusových průběhů, jejichž frekvence je násobkem základní frekvence v síti (50 Hz). Proudů vyšších harmonických vznikají u výroben, které pro svůj provoz používají frekvenční měniče nebo střídače. Fotovoltaické elektrárny jsou tedy velkým zdrojem

⁵⁴ PNE 33 3430-0. Výpočetní hodnocení zpětných vlivů odběratelů a zdrojů distribučních soustav. 4.vyd. Energetické společnosti, 2009.

⁵⁵ PNE 33 3430-2. Parametry kvality elektrické energie - část 2: kolísání napětí. 3. vyd. Energetické společnosti, 2010.

vyšších harmonických z důvodu použití výkonových střídačů pro přeměnu stejnosměrného proudu na střídavý.

Pro výroby v síti VN pro jedno předávací místo lze určit celkové přípustné proudy vyšších harmonických $I_{vpři}$ ze vztažných proudů $i_{vpři}$ z Tabulka 4, které vynásobíme zkratovým výkonem ve společném napájecím bodě S_{kV} .

$$I_{vpři} = i_{vpři} * S_{kV} \quad [A; A * MVA^{-1}, MVA] \quad (4)$$

V případě více zařízení v jednom napájecím bodě, můžeme určit celkové přípustné proudy pro jednotlivá zařízení vynásobením přípustného proudu jednotlivých zařízení s poměrem výkonů zdánlivého výkonu S_A k celkovému zdánlivému výkonu S_{AC} ve společném napájecím bodě⁵⁶.

$$I_{vpři} = I_{vpři} * \frac{S_A}{S_{AC}} \quad [A; A, MVA, MVA] \quad (5)$$

Řád harmonické v, μ	Přípustný vztažný proud harmonických		
	$i_{vpři} [A/MVA]$		
	Síť 10 kV	Síť 22 kV	Síť 35 kV
5	0,115	0,058	0,033
7	0,082	0,041	0,023
11	0,052	0,026	0,015
13	0,038	0,019	0,011
17	0,022	0,011	0,006
19	0,016	0,009	0,005
23	0,012	0,006	0,003
25	0,01	0,005	0,003
>25 nebo sudé	0,06/v	0,03/v	0,017/v
$\mu < 40$	0,06/v	0,03/v	0,017/v
$\mu > 40$	0,16/v	0,09/v	0,046/v

Tabulka 4 Přípustný vztažný proud harmonických zdrojů v síti VN⁵⁷

⁵⁶ PROVOZOVATELÉ DISTRIBUČNÍCH SOUSTAV. Pravidla pro paralelní provoz výroben a akumulčních zařízení se sítě: Příloha 4. [online] dostupné z: https://www.cezdistribuce.cz/edec/content/file-other/distribuce/energeticka-legislativa/ppds/ppds-2017_priloha-4.pdf, 2018, 78 s.

⁵⁷ Tamtéž.

5.3 Tlumení signálu HDO

Signály HDO se používají pro regulaci elektrické energie na straně spotřeby v případě odběru elektřiny s dvou tarifní sazbou. Tímto systémem je možné odběrateli dálkově přepínat tarif nebo zapínat a vypínat různé spotřebiče za účelem udržení rovnováhy mezi výrobou a spotřebou elektrické energie.

HDO využívá k zapínání a vypínání nízkonapětové signály s frekvencí vyšší než síťovou v České republice pak nejčastěji v rozmezí 183,3 až 283,3 Hz.

K tlumení signálu HDO dochází nejčastěji u výroben elektrické energie nebo u kompenzačních zařízení, které zvyšují zatížení sítě a přidávají impedanci vlastní výroby. Maximální dovolené snížení signálu HDO je 5 % za předpokladu, že po tomto snížení bude jeho hodnota, v případě sítě VN, minimálně 190 % náběhového napětí přijímače U_f .⁵⁸

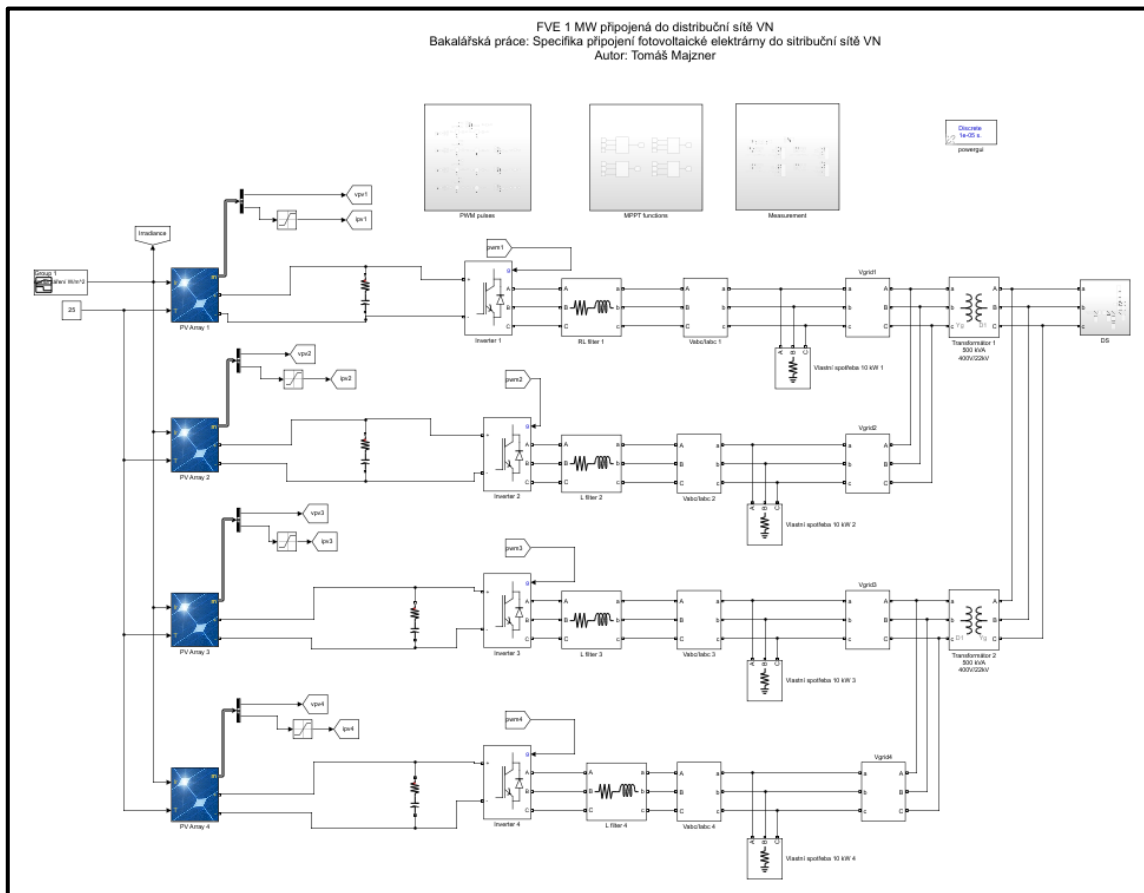
⁵⁸ PROVOZOVATELÉ DISTRIBUČNÍCH SOUSTAV. Pravidla pro paralelní provoz výroben a akumulčních zařízení se sítí: Příloha 4. [online] dostupné z: https://www.cezdistribuce.cz/edee/content/file-other/distribuce/energeticka-legislativa/ppds/ppds-2017_priloha-4.pdf, 2018, 78 s.

6 Model FVE o výkonu 1 MW připojené do DS VN

Model FVE byl vytvořen pomocí softwaru MATLAB od soukromé společnosti MathWorks. V našem modelu byla použita verze MATLAB R2020a, jejíž licence je studentům dostupná zadarmo po registraci na stránkách <https://www.mathworks.com/>. Pro naše potřeby bylo nejčastěji používáno rozšíření Simulink a jeho pod rozšíření Simscape. Rozšíření Simulink nám umožňuje vytvořit model FVE pomocí vzájemně propojitelných bloků. Rozšíření Simscape nám do Simulinku přidává bloky využívané pro tvorbu fyzikálních systémů sestávajících z mechanických, elektrických, hydraulických a dalších. Tento model nám poslouží pro zhodnocení vlivu FVE na DS, do které je připojen.

6.1 Popis modelu

Model se skládá ze čtyř fotovoltaických polí o výkonu přibližně 250 kW s centrálními střídači, které jsou přes 2 transformátory vyvedeny do DS na napěťové hladině 22 kV. Následující popis bude proveden pouze pro jedno z fotovoltaických polí a je identický pro ostatní pole. Schéma celého modelu můžeme vidět na Obr. 6-1.



Obr. 6-1 Model fotovoltaické elektrárny

6.1.1 Fotovoltaické pole

Hlavním blokem celého systému jsou samostatná fotovoltaická pole, která přeměňují sluneční energii v energii elektrickou. V našem modelu se jedno pole skládá z třiceti pěti stringů po dvaceti panelech v sérii. Vlastnosti panelu jsou nastaveny podle panelu firmy 1Soltech typ 1STH-350-WH o špičkovém výkonu 345,59 Wp. Tyto panely mají následující vlastnosti:

- Špičkový výkon P_{\max} : 349,59 Wp
- Napětí naprázdno U_{OC} : 51,5 V
- Napětí při maximálním výkonu U_{mp} : 43 V
- Teplotní koeficient napětí naprázdno k_{Voc} : -0,36 %/°C
- Proud nakrátko I_{SC} : 9,4 A
- Proud při maximálním výkonu I_{mp} : 8,13 A
- Teplotní koeficient proudu nakrátko k_{Isc} : 0,09 %/°C

Tyto údaje jsou dostupné z parametrů bloku fotovoltaického pole v softwaru MATLAB Obr. 6-2.

Module data	
Module:	1Soltech 1STH-350-WH
Maximum Power (W)	349.59
Cells per module (Ncell)	80
Open circuit voltage Voc (V)	51.5
Short-circuit current Isc (A)	9.4
Voltage at maximum power point Vmp (V)	43
Current at maximum power point Imp (A)	8.13
Temperature coefficient of Voc (%/deg.C)	-0.36
Temperature coefficient of Isc (%/deg.C)	0.09

Obr. 6-2 Parametry fotovoltaického panelu

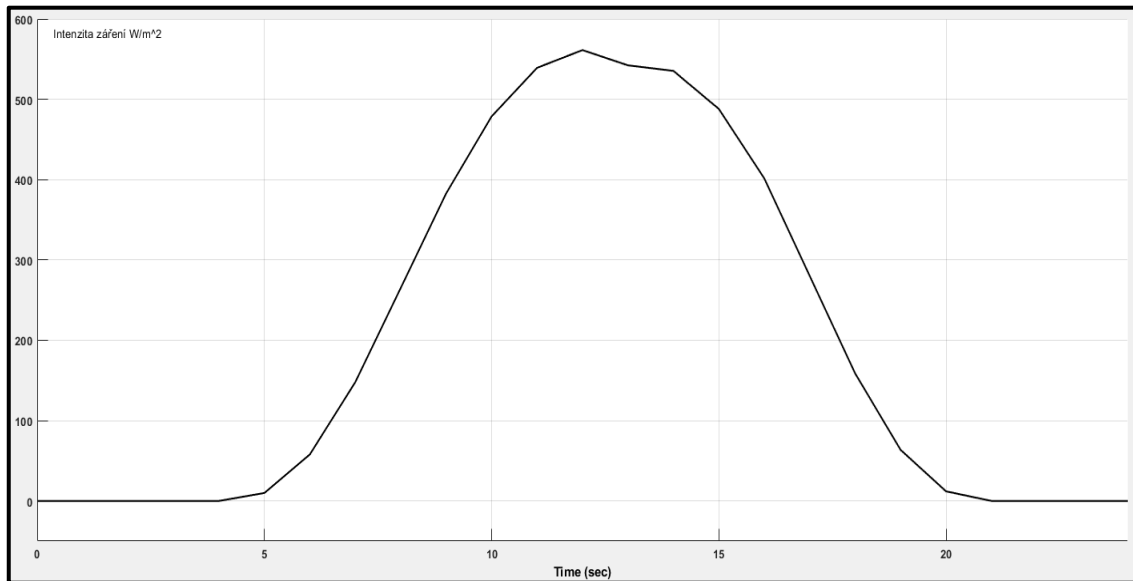
Při naší konfiguraci je maximální výkon pole 244,7 kW při napětí $U = 860$ V a proudu $I = 284,6$ A. Tyto údaje platí pro teplotu článku 25 °C a intenzitu záření 1 kW/m².

Do bloku fotovoltaického pole jsou přivedeny vstupní hodnoty teploty a intenzity záření v závislosti na čase. V našem případě je do bloku přivedena konstantní teplota 25 °C a blok generátoru signálu, který simuluje intenzitu záření v průběhu dne.

Hodnoty vložené do generátoru signálu byly staženy z webu PVWatts Calculator⁵⁹, který poskytuje průměrné hodnoty intenzity záření pro zadanou oblast pro celý rok po hodinách. V našem případě byly použity hodnoty pro oblast Mělníka a průměr hodin pro měsíc červenec. Výslednou časovou závislost intenzity záření na čase můžeme vidět na Obr. 6-3. Simulace počítá čas v sekundách, ale hodnoty byly zadány pro hodiny.

⁵⁹ NREL: PVWatts Calculator [online]. [cit. 2020-05-07]. Dostupné z: <https://pvwatts.nrel.gov/>

Typografická poznámka: Následující grafy průběhů veličin mají časovou osu popsanou v angličtině (time = čas), protože software MATLAB neumožňuje přepsání názvu této osy.

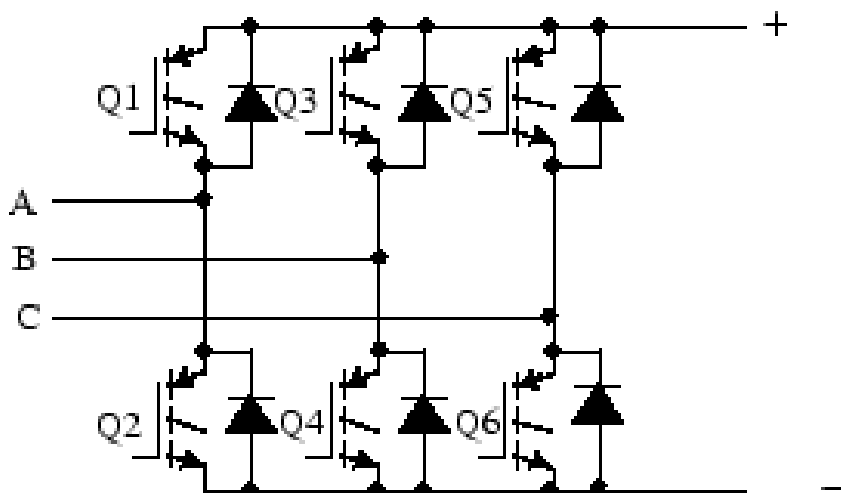


Obr. 6-3 Časová závislost intenzity záření na čase

6.1.2 Střídač

Pro přeměnu stejnosměrného proudu na střídavý byl použit tří fázový střídač složený z bipolárních tranzistorů s izolovaným hradlem a diod (IGBT-Diode) v zapojení dle Obr. 6-4.

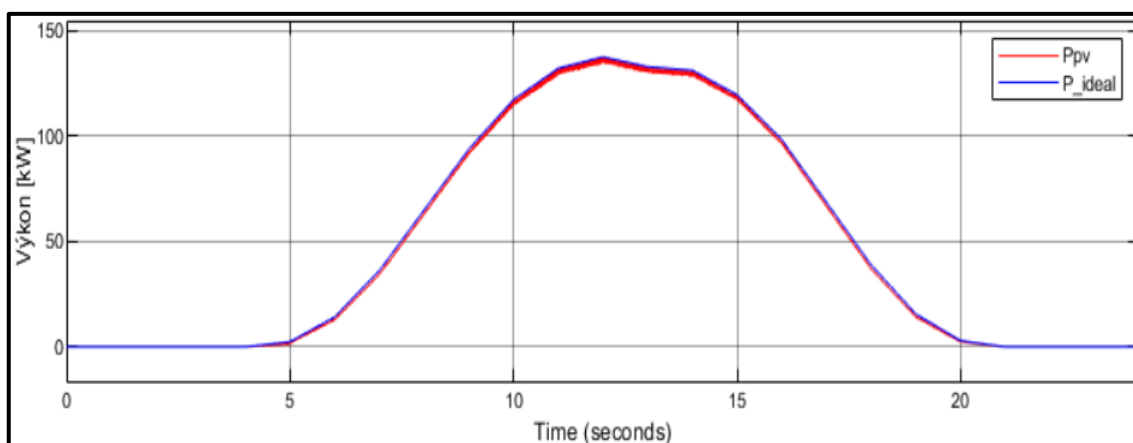
IGBT-Diode bridge:



Obr. 6-4 Zapojení součástek ve střídači⁶⁰

⁶⁰ MATHWORKS. Universal Bridge. *MathWorks* [online]. c1994-2020 [cit. 2020-05-07]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/universalbridge.html>

Řízení střídače bylo převzato z „MPPT Based Model Predictive Control of Grid Connected Inverter for PV Systems“⁶¹. Tento řídicí systém zajišťuje maximální výkon i při rychlých změnách intenzity záření. Referenční proud pro pulsně šířkovou modulaci je zde vytvořen pomocí metody „Perturb and Observe“, neboli změn a pozoruj, která je synchronizovaná s fází sítě, do které je střídač vyveden. Metoda „Perturb and Observe“ funguje na principu pozorování změny výkonu při změně referenčního proudu o zadaný krok. Pokud se výkon při změně referenčního proudu zvýší, bude tento krok proveden znovu. V opačném případě bude proveden krok zpátky a celý tento cyklus se opakuje. Výhodou této metody synchronizovanou s fází sítě, je rychlá odezva na měnící se intenzitu záření, kterou můžeme vidět na následujícím obrázku Obr. 6-5. Modrá linie zobrazuje ideální výkon pole vypočtený jako součin intenzity záření a maximálního výkonu pole, přepočtený na kW. Červená linie ukazuje dosažený výkon, vypočtený jako součin výstupního proudu a výstupního napětí, převedený na kW.

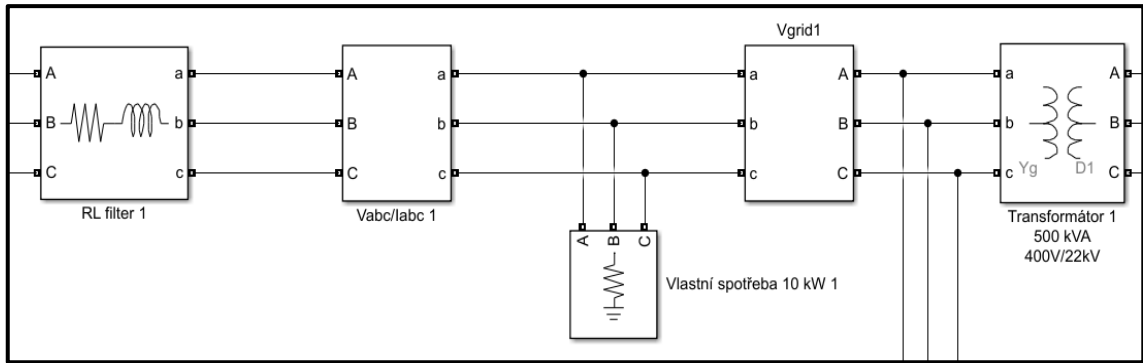


Obr. 6-5 Výkon fotovoltaického pole

6.1.3 Meziobvod

V obvodu mezi střídačem, jak můžeme vidět na Obr. 6-6, je zapojen filtr vyšších harmonických a také je zde vyvedena vlastní spotřeba tohoto fotovoltaického pole. V této části protéká proud až 370 A při napětí 260 V pro největší intenzitu záření. Dále jsou v tomto obvodu zapojeny dvě měření proudu a napětí. První měřicí blok „Vabc/Iabc 1“ slouží k výpočtu výkonu dodávaného polem před odečtením vlastní spotřeby a druhý měřicí blok „Vgrid1“ slouží k zaznamenávání úhlové rychlosti, která je pak použita v řízení střídače.

⁶¹ GÜLLER, N. a E. IRMAK. MPPT Based Model Predictive Control of Grid Connected Inverter for PV Systems. 10.1109/ICRERA47325.2019.8997105. 2019

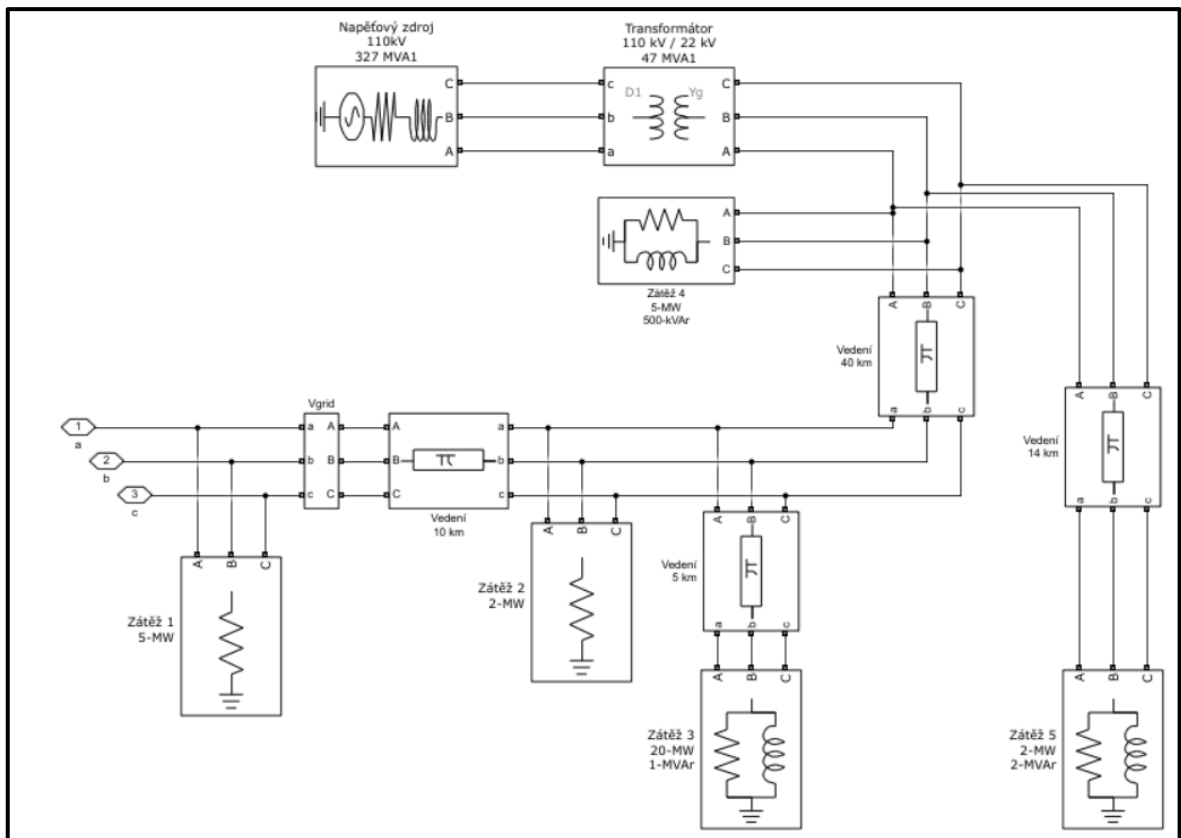


Obr. 6-6 Meziobvod fotovoltaického pole

Jako transformátor byla použita konfigurace tří jednofázových transformátorů o celkovém jmenovitém výkonu 500 kVA s převodem napětí 400 V/22 kV.

6.1.4 Distribuční soustava

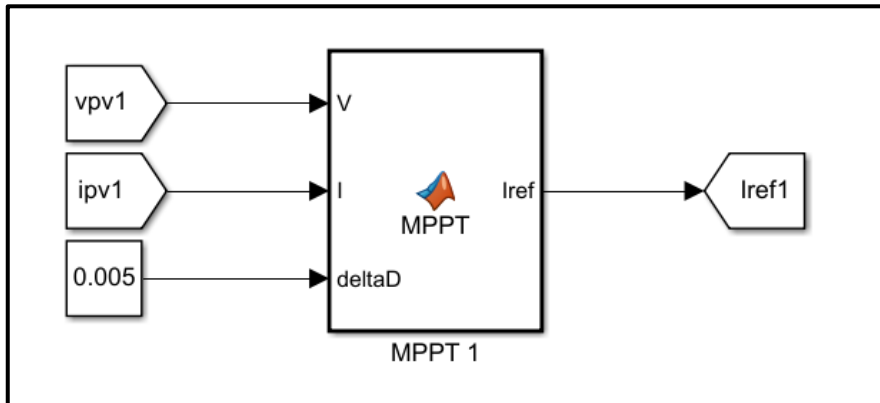
Aby bylo možné posoudit vliv FVE na DS je nutné vytvořit její vhodný model, do které je FVE připojena. V našem případě byla vytvořena část DS na napěťové hladině 22 kV, která obsahuje různé zátěže a různě dlouhé vedení mezi nimi. DS je napájena z transformátoru o zdánlivém výkonu 47 MVA s převodem 110 kV/22 kV, který je napájen z napěťového zdroje o zdánlivém výkonu 327 MVA a napěťové hladině 110 kV. Součástí DS jsou také dvě měření napětí a proudu. Rozložení jednotlivých částí můžeme vidět na následujícím obrázku modelu Obr. 6-7.



Obr. 6-7 Model distribuční soustavy

6.1.5 Subsystem „MPPT functions“

Jak již bylo zmíněno v části 6.1.2, pro řízení střídače FVE je použit systém pro získání maximálního výkonu. V subsystému „MPPT functions“, jehož schéma je na Obr. 6-8, můžeme najít bloky, které obsahují funkci zprostředkovávající metodu „Perturb and Observe“. Vstupem do této funkce je výstupní stejnosměrné napětí a proud z fotovoltaického pole a zadaný krok, o který funkce mění referenční proud.



Obr. 6-8 Blok funkce "Perturb and Observe"

6.1.6 Subsystem „PWM pulses“

Účelem tohoto subsystému je vytvořit zpětnovazební smyčku, která porovnává výstupní proud střídače s referenčním proudem ze subsystému popsaném v 6.1.5. Výstup této smyčky je poté vložen do generátoru pulzů pro střídač.

6.1.7 Subsystem „Measurement“

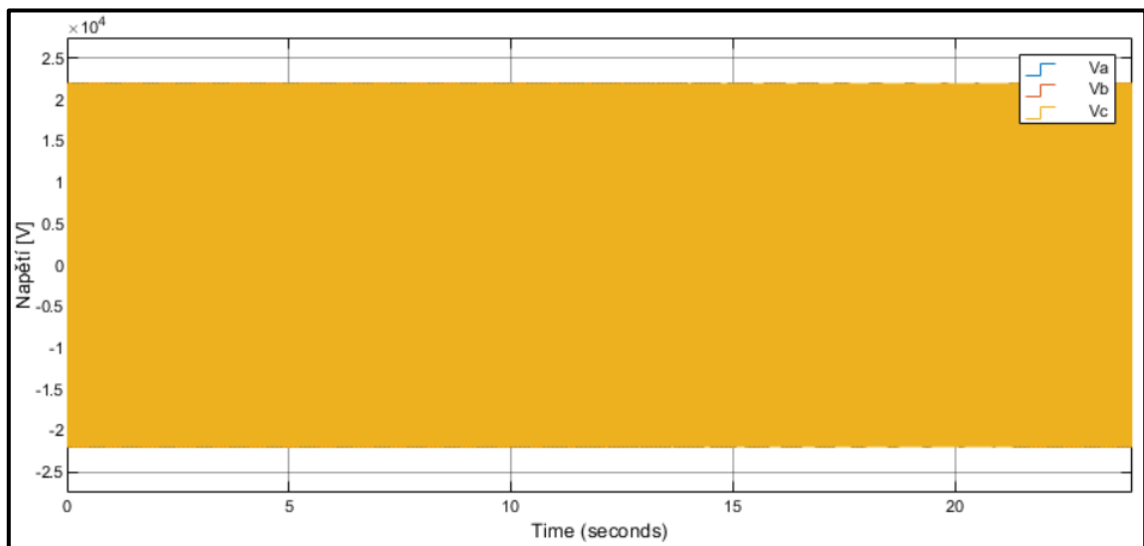
Poslední částí našeho modelu je subsystém, který obsahuje výsledky všech měření. Grafy měřených veličin je možné zobrazit rozkliknutím příslušného bloku „Scope“.

7 Posouzení vlivu FVE na DS VN

7.1 Změna napětí

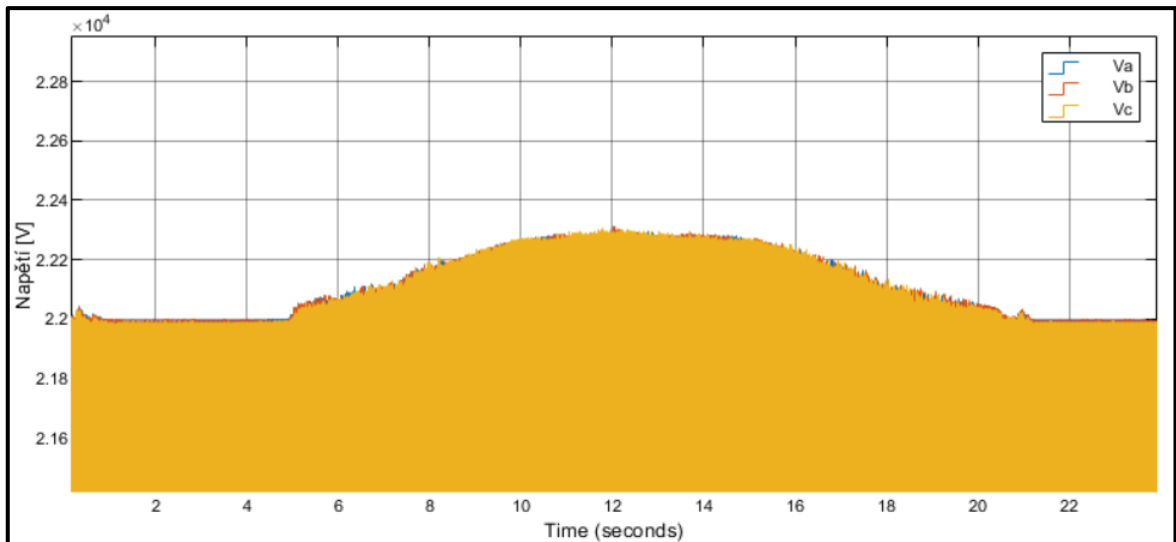
Připojením jakékoliv výrobní elektrické energie dochází k ovlivnění napětí v DS vlivem dodávky výkonu. Problémem FVE je dynamicky se měnící výstupní výkon, a tedy i rychlé změny v napětí, které se musí regulovat, aby nedošlo k poškození zařízení, která jsou vyráběna na určité napěťové hladině.

Model DS byl vytvořen tak, aby při odpojení FVE byla v připojovacím bodě hladina napětí 22 kV. Graf průběhu napětí v průběhu simulace můžeme vidět na Obr. 7-1, kde „Va, Vb, Vc“ jsou jednotlivé fáze.

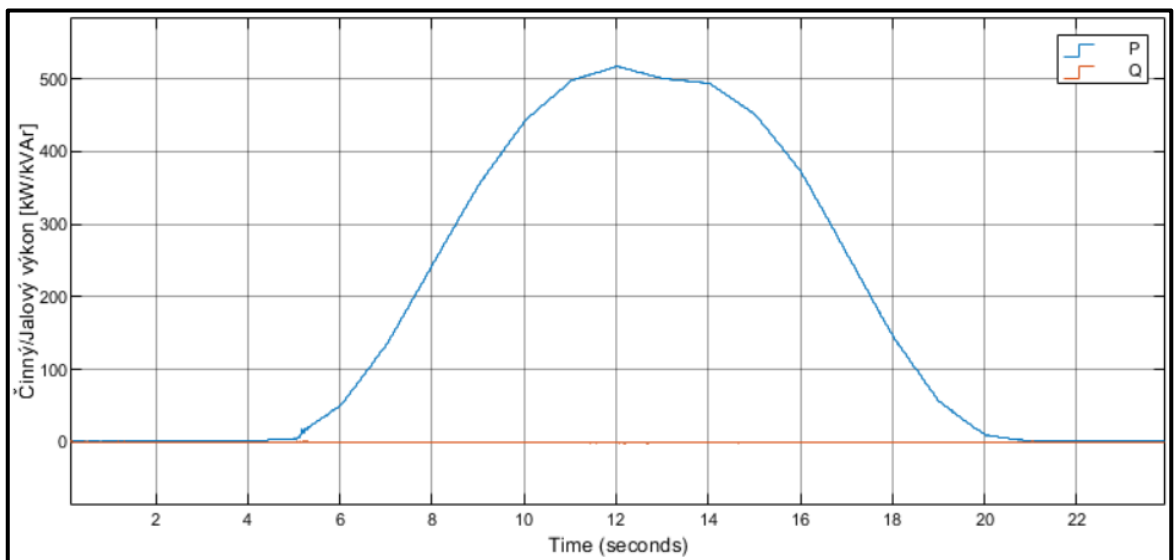


Obr. 7-1 Průběh napětí v připojovacím bodě bez FVE

Připojením FVE do DS můžeme pozorovat, jaký vliv má výkon elektrárny na napětí v přípojném bodě. V našem případě vzrostlo při maximálním výkonu 530 kW napětí v přípojném bodě o 300 V neboli o 1,36 % napětí bez připojené elektrárny. V případě připojení větší FVE už by mohlo dojít k překročení 2 %, která jsou stanovena jako maximální povolená změna napětí v připojovacím bodě. Změnu napětí v připojovacím bodě s připojenou FVE můžeme pozorovat na Obr. 7-2. Výkon dodaný FVE v průběhu simulace pak na Obr. 7-3, kde „P“ je činný výkon a „Q“ jalový výkon.



Obr. 7-2 Průběh napětí v připojovacím bodě s FVE

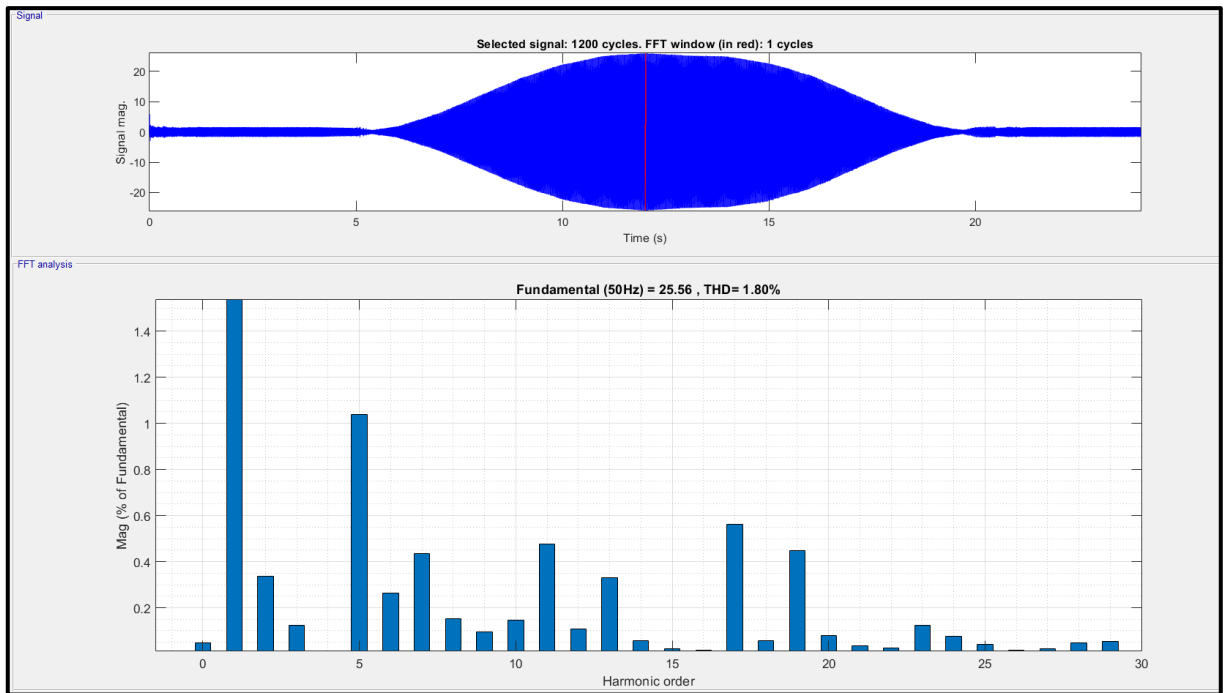


Obr. 7-3 Výkon dodávaný FVE

7.2 Proudů vyšších harmonických

Jak již bylo zmíněno v kapitole 5.2, střídače ve FVE jsou zdrojem nežádoucích proudů vyšších harmonických, které zhoršují celkovou kvalitu elektrické energie. Software MATLAB nám umožňuje provést rychlou Fourierovu transformaci, která převede vstupní signál z časové domény do domény frekvenční. V této doméně pak můžeme pozorovat jednotlivé řády vyšších harmonických, které se vyskytují v našem fotovoltaickém systému.

Na Obr. 7-4 můžeme vidět zastoupení jednotlivých řádů vyšších harmonických proudů relativně k základní harmonické (50 Hz). Tato analýza je provedena pro signál proudu vstupujícího do DS za našeho modelu FVE po transformování na napěťovou hladinu 22kV.

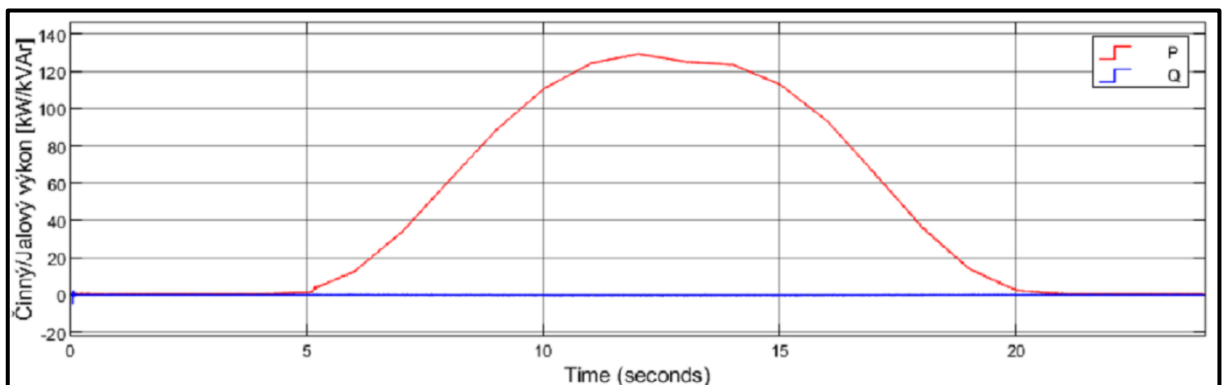


Obr. 7-4 Analýza vyšších harmonických proudů vstupujícího do DS

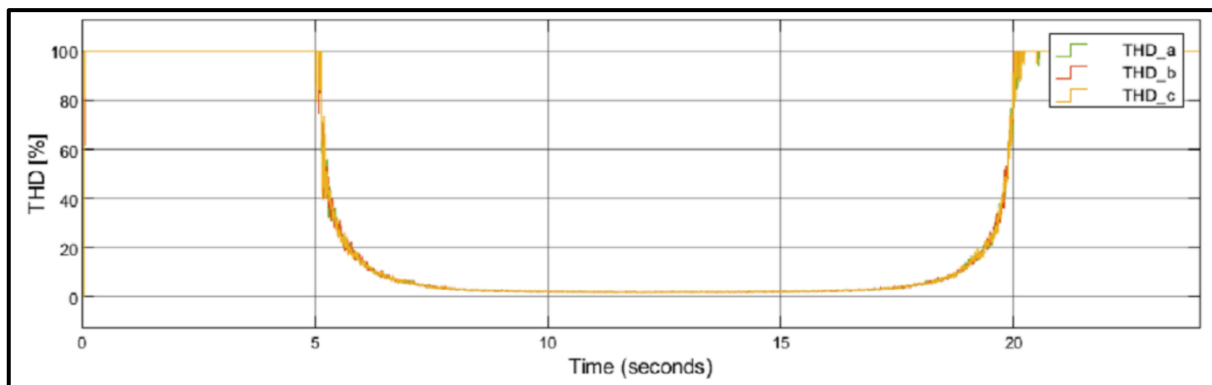
Další možností analýzy kvality dodávaného proudu je celkové harmonické zkreslení neboli THD (z anglického Total Harmonic Distortion), které vyjadřuje poměr mezi odmocninou ze součtu kvadrátu proudu harmonických řádu dva a více ku proudu základní harmonické. THD se počítá dle následující rovnice:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad [--; A, A] \quad (6)$$

Celkové harmonické zkreslení se v průběhu simulace mění v závislosti na výkonu fotovoltaického pole. Na grafu hramonického zkreslení výstupního proudu střídače v průběhu simulace na Obr. 7-6, můžeme vidět, že s rostoucím výkonem fotovoltaického pole na Obr. 7-5 THD klesá. Při nulovém dodávaném výkonu je pak THD 100 %.



Obr. 7-5 Výkon dodávaný jedním fotovoltaickým polem



Obr. 7-6 THD výstupního proudu ze střídače

7.3 Shrnutí výsledků

Pomocí modelu FVE v softwaru MATLAB jsme se mohli přesvědčit a negativním vlivu způsobeným touto elektrárnou na DS VN, jmenovitě pak o změně hladiny napětí vlivem provozu elektrárny a harmonickém zkreslení.

V našem případě došlo k zvýšení napětí o 1,36 % při maximálním výkonu elektrárny, pokud by však zvýšení přesáhlo 2 %, bylo by nutné ho v reálné elektrizační soustavě nějakým způsobem kompenzovat. Pokud by se napětí nekompenzovalo mohlo by dojít k zhoršení funkčnosti nebo snížení doby životnosti zařízení připojených v DS. Nevýhodou FVE obecně, je jejich závislost na počasí, které se nedá přesně předpovídat, a tedy je složité připravit DS na proměnlivý výkon.

Stejně tak je nutné filtrovat harmonické zkreslení. Proudů vyšších harmonických způsobují činné ztráty na vedení, avšak jejich výkon se nedá využít. Celkově je pak nutné dimenzovat zařízení v síti na vyšší výkon. U zařízení citlivých na napájecí napětí by pak mohlo dojít k omezení jejich funkčnosti, nebo úplnému přerušení jejich provozu.

Model nebyl vytvořen dle reálné elektrárny a jednotlivé hodnoty byly námi voleny nebo byly ponechány výchozí.

8 Závěr

S rostoucím zájmem o využití obnovitelných zdrojů energie, a tedy i o fotovoltaické elektrárny, se budeme častěji setkávat s problémy v distribuční soustavě, které vznikají zejména díky nepředvídatelnosti výroby těchto zdrojů. V první části této práce jsou popsány jednotlivé komponenty běžné fotovoltaické elektrárny připojené do distribuční sítě vysokého napětí. Další částí se již zabývají přesným postupem připojení nové elektrárny do distribuční sítě a jejím provozem v ní, s částí věnovanou negativním vlivům jejího provozu, které jsou poté posouzeny v praktické části. Praktickou část jsem rozdělil do dvou částí. První část popisuje mnou vytvořený model fotovoltaické elektrárny a část druhá posuzuje vlivy této elektrárny na model distribuční sítě, do které je připojena.

V praktické části jsme došli k závěru, že provoz fotovoltaické elektrárny má některé negativní vlivy na provoz a stabilitu distribuční soustavy, jmenovitě pak kolísání napětí v síti z důvodu nestabilního výkonu fotovoltaické elektrárny a harmonického zkreslení proudu. V případě většího podílu výroby elektrické energie z fotovoltaických elektráren bude nutné tyto vlivy kompenzovat. Obsah této práce tak splnil všechny body zadání pro popis elektrárny, jejího připojení a provozu a posouzení negativních vlivů.

Tato práce představuje ucelený soubor informací a principů týkajících se složení a provozu fotovoltaické elektrárny v distribuční síti v České republice. Tato práce mi umožnila hlouběji proniknout jak do problematiky stavby a provozu fotovoltaické elektrárny, tak i do vlastností a řízení distribuční soustavy. V návaznosti na tuto práci by bylo vhodné vytvořit model fotovoltaické elektrárny, který splňuje všechny požadavky na její provoz v distribuční soustavě České republiky včetně řízení jalového výkonu a automatického odpojování v případě nutnosti.

9 Seznam použité literatury

- [1] ASPENCORE. Bypass Diodes in Solar Panels and Arrays. In: ElectronicsTutorials [online]. AspenCore, c2020 [cit. 2020-03-25]. Dostupné z: <https://www.electronics-tutorials.ws/diode/bypass-diodes.html>
- [2] BENDA, Vítězslav. Výukové materiály k předmětu Elektrochemické zdroje a fotovoltaika (B1B13SEZ): Konstrukce a technologie PV článků a modulů.
- [3] COMMISSION REGULATION (EU) 2016/631 of 14 April 2016 establishing a network code on requirements for grid connection of generators. 2016.
- [4] ČEPS [online]. Praha [cit. 2020-03-25]. Dostupné z: <https://www.ceps.cz/>
- [5] ČESKÁ REPUBLIKA. Vyhláška o měření elektřiny a o způsobu stanovení náhrady škody při neoprávněném odběru, neoprávněné dodávce, neoprávněném přenosu nebo neoprávněné distribuci elektřiny. In: Sběrka zákonů. 2011, 31/2011.
- [6] ČESKÁ REPUBLIKA. Vyhláška o podmínkách připojení k elektrizační soustavě. In: *Sběrka zákonů*. 2016, 16/2016.
- [7] ČEZ, a. s. Fotovoltaický článek [online]. In: . c2020 [cit. 2020-05-05]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/obr/k32-1.gif>
- [8] ČSN EN 50 438. Požadavky na paralelní připojení mikrogenerátorů s veřejnými distribučními sítěmi nízkého napětí. ED.2. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
- [9] GÜLLER, N. a E. IRMAK. MPPT Based Model Predictive Control of Grid Connected Inverter for PV Systems. 10.1109/ICRERA47325.2019.8997105. 2019.
- [10] HASELHUHN, Ralf. Fotovoltaika: budovy jako zdroj proudu. Ostrava: HEL, 2011. ISBN 978-80-86167-33-6.
- [11] HQ LINE. Fotovoltaické panely | Solární a fotovoltaické panely, sluneční kolektory a elektrárny, solární systémy. Hqline [online]. c1995-2020 [cit. 2020-03-25]. Dostupné z: <https://www.hqline.com/fotovoltaicke-panely>

- [12] JURAJDA, Pavel. Ochranné a spínací přístroje FV zdrojů. Elektro. 2010, (2), 32-33.
- [13] KOCANDA, Tomáš. Odpínání a jistění DC rozvodů fotovoltaických elektráren. Solar Technika [online]. Webmax, 2008 [cit. 2020-03-25]. Dostupné z: <http://www.solartechnika.sk/solartechnika-22010/odpinani-a-jisteni-dc-rozvodu-fotovoltackych-elektren.html>
- [14] LEONICS. Basics of Maximum Power Point Tracking (MPPT) Solar Charge Controller. Leonics [online]. c2019 [cit. 2020-03-25]. Dostupné z: http://www.leonics.com/support/article2_14j/articles2_14j_en.php
- [15] LIBRA, Martin a Vladislav POULEK. Fotovoltaika: teorie i praxe využití solární energie. Praha: Ilsa, 2009. ISBN 978-80-904311-0-2.
- [16] MATHWORKS. Universal Bridge. MathWorks [online]. c1994-2020 [cit. 2020-05-07]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/universalbridge.html>
- [17] MURTINGER, Karel, Jiří BERANOVSKÝ a Milan TOMEŠ. Fotovoltaika, elektřina ze slunce. Brno: ERA, 2007. 21. století. ISBN 978-80-7366-100-7.
- [18] NAŘÍZENÍ KOMISE (EU) 2016/631 ze dne 14. dubna 2016, kterým se stanoví kodex sítě pro požadavky na připojení výroben k elektrizační soustavě. 2016.
- [19] NREL: PVWatts Calculator [online]. [cit. 2020-05-07]. Dostupné z: <https://pvwatts.nrel.gov/>
- [20] OEZ S.R.O. Obecné schéma FV zdroje pracujícího paralelně s distribuční sítí. In: OEZ [online]. c2018 [cit. 2020-03-27]. Dostupné z: <http://www.oez.cz/aktuality/obecne-schema-zapojeni-fotovoltackeho-zdroje>
- [21] PNE 33 3430-0. Výpočetní hodnocení zpětných vlivů odběratelů a zdrojů distribučních soustav. 4.vyd. Energetické společnosti, 2009.
- [22] PNE 33 3430-2. Parametry kvality elektrické energie - část 2: kolísání napětí. 3. vyd. Energetické společnosti, 2010.

- [23] POWER-ENERGO. AMORFNÍ transformátory - ABB - Produkty. Power-Energo [online]. [cit. 2020-03-25]. Dostupné z: <https://www.power-energo.cz/produkty/amorfni-transformatory-abb.html>
- [24] PROVOZOVATELÉ DISTRIBUČNÍCH SOUSTAV. Pravidla pro paralelní provoz výroben a akumulčních zařízení se sítí: Příloha 4. [online] dostupné z: https://www.cezdistribuce.cz/edee/content/file-other/distribuce/energeticka-legislativa/ppds/ppds-2017_priloha-4.pdf, 2018, 78 s.
- [25] REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. Fyzikální podstata fotoelektrického jevu. Encyklopedie fyziky [online]. c2006-2020 [cit. 2020-03-27]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/723-fyzikalni-podstata>
- [26] ŠVEC, Jan. Výukové materiály k předmětu Elektroenergetika 1 (B1B15EN1): Zkratky v ES.
- [27] TINDO SOLAR. Poly vs Mono Crystalline. Tindo Solar [online]. c2020 [cit. 2020-03-25]. Dostupné z: <https://www.tindosolar.com.au/learn-more/poly-vs-mono-crystalline/>
- [28] TZB-INFO. Jak zjistím ke které distribuční soustavě elektřiny patřím. Tzb-info [online]. c2001-2020 [cit. 2020-03-25]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/ceny-paliv-a-energii/211-jak-zjistim-ke-ktere-distribucni-soustave-elekriny-patrim-a-mohu-si-zvolit-jinou>
- [29] VÁPENÍK, René. Elektrevue Regulace napětí v distribuční soustavě vn a mn. 2011, 13(3). ISSN 1213-1539.

Seznam obrázků

Obr. 2-1 Obecné schéma FV zdroje pracujícího paralelně s distribuční sítí	10
Obr. 2-2 Detail fotovoltaického pole	10
Obr. 2-3 Fotovoltaický článek.....	11
Obr. 2-4 Křemíkový článek a) polykrystalický b) monokrystalický.....	12
Obr. 2-5 Řez fotovoltaickým panelem	14
Obr. 3-1 Rozdělení působnosti PDS v České republice.....	20
Obr. 4-1 Dodávka/odběr Q při maximální dodávce P.....	27
Obr. 4-2 Dodávka/odběr Q při nižší než maximální dodávce P.....	27
Obr. 4-3 Schopnost překonání poruchy pro VM se střídačem	28
Obr. 4-4 Snížení činného výkonu při nadfrekvenci	29
Obr. 4-5 Rozsah snížení výkonu při podfrekvenci.....	30
Obr. 6-1 Model fotovoltaické elektrárny	34
Obr. 6-2 Parametry fotovoltaického panelu	35
Obr. 6-3 Časová závislost intenzity záření na čase	36
Obr. 6-4 Zapojení součástek ve střídači.....	36
Obr. 6-5 Výkon fotovoltaického pole	37
Obr. 6-6 Meziobvod fotovoltaického pole	38
Obr. 6-7 Model distribuční soustavy.....	38
Obr. 6-8 Blok funkce "Perturb and Observe"	39
Obr. 7-1 Průběh napětí v přípojovacím bodě bez FVE.....	40
Obr. 7-2 Průběh napětí v přípojovacím bodě s FVE.....	41
Obr. 7-3 Výkon dodávaný FVE	41
Obr. 7-4 Analýza vyšších harmonických proudů vstupujícího do DS	42
Obr. 7-5 Výkon dodávaný jedním fotovoltaickým polem	42
Obr. 7-6 THD výstupního proudu ze střídače.....	43

Seznam tabulek

Tabulka 1 Rozdělení VM do kategorií.....	24
Tabulka 2 Frekvenční rozsah výroben.....	25
Tabulka 3 Rozsah napětí pro výrobní připojené do sítě VN.....	26
Tabulka 4 Přípustný vztažný proud harmonických zdrojů v síti VN.....	32