



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

PROJEKTOVÁ DOKUMENTACE FVE KATEGORIE B1

PROJECT DOCUMENTATION OF PHOTOVOLTAIC POWER PLANT CATEGORY B1

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jan Reháček

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Morávek, Ph.D.

BRNO 2023

Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

Student: Bc. Jan Reháč

ID: 191626

Ročník: 2

Akademický rok: 2022/23

NÁZEV TÉMATU:

Projektová dokumentace FVE kategorie B1

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Rešerše požadavků na připojení FV výroben kategorie B1 do distribuční soustavy
2. Rešerše požadavků na dispečerské řízení a možností jeho zajištění
3. Návrh uspořádání FV systému pro vnořenou výrobu sestavenou z několika objektů (individuální rozpadová místa) s využitím dostupných SW nástrojů (např. PV SOL)
4. Tvorba projektové dokumentace, včetně technické zprávy, výkazu výměr a rozpočtu
5. Ekonomické zhodnocení projektu

DOPORUČENÁ LITERATURA:

doporučená literatura podle pokynů vedoucího závěrečné práce

Termín zadání: 6.2.2023

Termín odevzdání: 22.5.2023

Vedoucí práce: Ing. Jan Morávek, Ph.D.

prof. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Práce se zabývá problematikou fotovoltaických elektráren. Jsou zde zkoumány podmínky paralelního připojení výroben o instalovaném výkonu 100 kW až 1 MW k elektrické síti, jednotlivé prvky výroben a způsoby pro zajištění dálkového řízení a výměny dat. Praktická část práce se zabývá tvorbou projektové dokumentace vnořené výrobní, situované na budovách areálu FEKT VUT v Brně. V poslední části práce je pak provedeno ekonomické zhodnocení projektu.

Klíčová slova

Fotovoltaická elektrárna, výrobní, vnořená výrobní, chování výrobní v síti, dálkové dispečerské řízení, projektová dokumentace, střídač

Abstract

This thesis focuses on project documentation for a photovoltaic power plant. Requirements for parallel connection of power plants with installed power from 100 kW to 1 MW to the distribution grid are studied. Next, research has been conducted on individual components and options for local and dispatch control of photovoltaic power plants. The practical part of the thesis focuses on the creation of project documentation for an embedded photovoltaic power plant located in the buildings of FEKT Brno University of Technology. The final part of the thesis includes an economic evaluation of the project.

Keywords

Photovoltaic power plant, power plant, embedded power plant, dispatch control, project documentation, inverter

Bibliografická citace

REHÁK, Jan. *Projektová dokumentace FVE kategorie B1*. Brno, 2023. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/152578>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky. Vedoucí práce Jan Morávek.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta: Jan Reháček
VUT ID studenta: 191626
Typ práce: Diplomová práce
Akademický rok: 2022/23
Téma závěrečné práce: Projektová dokumentace FVE kategorie B1

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

V Brně dne: 15. května 2023

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Janu Morávkovi, Ph.D. za odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne: 15. května 2023

podpis autora

Obsah

ÚVOD	11
1. POŽADAVKY PDS NA VÝROBNY KATEGORIE B1.....	12
1.1 PODMÍNKY CHOVÁNÍ VÝROBNY V SÍTI	12
1.1.1 Požadavky na automatické funkce střídačů	12
1.1.2 Regulace jalového výkonu.....	12
1.1.3 Regulace činného výkonu.....	13
1.1.4 Zpětné vlivy na napájecí síť	15
1.2 ROZPADOVÉ MÍSTO	17
1.2.1 Schémata připojení k síti.....	17
1.2.2 Fakturační měření.....	19
1.2.3 Spínací zařízení.....	19
1.2.4 Nastavení ochran	19
1.3 DÁLKOVÉ ŘÍZENÍ A VÝMĚNA DAT.....	19
1.3.1 Požadavky na výměnu dat	20
1.3.2 Komunikační zařízení.....	20
1.4 SROVNÁNÍ POŽADAVKŮ JEDNOTLIVÝCH PDS V ČR	21
2. NÁVRH VÝROBNY	22
2.1 ANALÝZA OBJEKTŮ	22
2.2 VYMEZENÍ PROSTORU PRO INSTALACI PANELŮ	24
2.2.1 Výpočet dostatečné vzdálenosti pro dosažení elektrické izolace vnějšího LPS.....	25
2.3 FOTOVOLTAICKÉ PANELE	26
2.3.1 Orientace a sklon	26
2.3.2 Srovnání vyrobené energie pro dva typy uspořádání.....	28
2.3.3 Nosné konstrukce	30
2.3.4 Uspořádání panelů a celkový instalovaný výkon	31
2.3.1 Výpočet dodatečných zátěží nosných konstrukcí.....	31
2.4 DC STRANA.....	32
2.4.1 Topologie DC strany.....	33
2.4.2 Výběr střídačů.....	35
2.4.3 Dimenzování stringů	37
2.4.4 DC kabeláž a kabelové trasy.....	39
2.4.5 DC Rozváděče.....	40
2.4.6 Ochrana před přepětím.....	41
2.4.7 Doplnující ochranné pospojování	42
2.4.8 Systém vypnutí na úrovni panelu.....	42
2.5 AC STRANA.....	43
2.5.1 Ochrany AC	43
2.5.2 Rozváděče AC	44
2.5.3 Vyvedení výkonu.....	45
2.6 ŘÍZENÍ VÝROBNY A DATOVÁ KOMUNIKACE.....	46
2.6.1 Komunikace se střídači.....	47
2.6.2 Provedení datové komunikace.....	47

3. EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ PROJEKTU	49
3.1 POLOŽKOVÝ ROZPOČET	49
3.2 EKONOMICKÁ EFEKTIVITA INVESTICE	50
3.3 DOTAČNÍ PODPORA	53
3.4 CELKOVÝ PŘEHLED	54
ZÁVĚR	55
LITERATURA	57
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	59

Seznam obrázků

obr. 1.1 PQ diagram povinné dodávky jalového výkonu dle [2]	13
obr. 1.2 Omezení činného výkonu při nadfrekvenci dle [2].....	14
obr. 1.3 Maximální přípustné snížení činného výkonu při nadfrekvenci dle [2].....	15
obr. 1.4 Schéma připojení do NN	17
obr. 1.5 Schéma připojení na vedení VN	18
obr. 1.6 Schéma připojení do rozvodny VN (vlevo) a zasmyčkováním do vedení (vpravo)	18
obr. 2.1 Jižní pohled na objekt T12 [14]	22
obr. 2.2 Půdorysy střech budov C a D objektu T12 v katastrální mapě	23
obr. 2.3 Jižní pohled na objekty T8 a T10 [14]	23
obr. 2.4 Půdorys střech objektů T8 a T10 v katastrální mapě	24
obr. 2.5 Část půdorysu střechy s vyznačenou jímací soustavou	26
obr. 2.6 Intenzita záření v průběhu roku – východní orientace	27
obr. 2.7 Intenzita záření v průběhu roku – jižní orientace.....	28
obr. 2.8 Objekt T8+T10 jižní uspořádání.....	28
obr. 2.9 Objekt T8+T10 V-Z uspořádání	29
obr. 2.10 Porovnání vyrobené energie v jednotlivých měsících pro různá uspořádání	30
obr. 2.11 Nosná konstrukce panelů při V-Z uspořádání	30
obr. 2.12 Rozmístění panelů- část střechy T10	31
obr. 2.13 Blok složený z 16 panelů	32
obr. 2.14 Centrální topologie	33
obr. 2.15 Topologie master-slave.....	33
obr. 2.16 String topologie s příčnými spínači	34
obr. 2.17 Multistring topologie	34
obr. 2.18 Účinnost střídače Fronius SYMO 20.0-3-M v závislosti na DC napětí a výstupním výkonu 0 ..	37
obr. 2.19 DC rozváděč s použitím pojistkových odpojovačů	41
obr. 2.20 Umístění přepětových ochran v budově se systémem ochrany před bleskem	42
obr. 2.21 Schéma systému vypnutí na úrovni panelu.....	43
obr. 2.22 Liniové schéma RAC část 1	45
obr. 2.23 Liniové schéma RAC část 2	45
obr. 2.24 Blokové schéma vyvedení výkonu vnořené výroby	46
obr. 2.25 Blokový diagram řízení výroby	46
obr. 2.26 Propojení střídačů přes sériovou linku (vlevo) a paprskově (vpravo)	47
obr. 2.27 Blokové schéma datové komunikace.....	48
obr. 3.1 Srovnání diagramů výroby a spotřeby činného výkonu objektu T12	51

Seznam tabulek

tab. 1.1 Výčet požadavků na funkce střídačů z hlediska podpory sítě [2] [3].....	12
tab. 1.2 Přípustné vztažné proudy harmonických [2].....	16
tab. 1.3 Parametry pro nastavení ochran rozpadového místa [2]	19
tab. 2.1 Hodnoty koeficientu k_i	25
tab. 2.2 Porovnání roční vyrobené energie a instalovaného výkonu pro různá uspořádání	29
tab. 2.3 Celkový instalovaný výkon panelů výroby	31
tab. 2.4 Parametry střídačů Fronius SYMO 12,5 až 20 kW [14]	36
tab. 2.5 Příklad konfigurace střídače Fronius SYMO 20 kW	38
tab. 2.6 Přehled dimenzování stringů dílčích výroben	39
tab. 2.7 Proudová zatížitelnost fotovoltaických kabelů [9]	40
tab. 3.1 Rozpis cen dle objektů a celková cena	49
tab. 3.2 Roční dodaná energie dle jednotlivých výroben	50
tab. 3.3 Odhad roční ceny za elektrickou energii pro objekt T12	52
tab. 3.4 Prostá doba návratnosti investice	53
tab. 3.5 Celkový přehled výroby	54
tab. 3.6 Obsah elektronické přílohy	61

ÚVOD

Počet fotovoltaických elektráren se v ČR neustále zvyšuje. V roce 2022 došlo k nejvyššímu meziročnímu nárůstu instalovaného výkonu fotovoltaických elektráren od roku 2014 [1]. Jejich rostoucí instalovaný výkon a počet s sebou přináší i zvětšení vlivu na elektrizační soustavu. Pro udržitelný rozvoj energetické soustavy je proto nezbytné, aby výroby byly vhodně navrženy, a aby se podílely na udržování napěťových a frekvenčních poměrů v ní. Toho je dosaženo standardizací technických požadavků na výroby a jejich připojování k elektrizační soustavě. Projektová dokumentace má za cíl zajistit co nejefektivnější využití dostupných prostředků, při zajištění souladu s těmito požadavky a je klíčová pro úspěšnou realizaci projektu.

Cílem této práce je provést rešerši normativních a legislativních požadavků a vytvořit projektovou dokumentaci pro stavbu vnořené fotovoltaické výroby na objektech FEKT VUT. Předmětná výroba má sloužit jako úsporné opatření pro snížení nákladů na elektrickou energii areálu VUT Pod Palackého vrchem. Vzhledem k prostorovým možnostem určených objektů bude výroba spadat do výkonové kategorie B1. Ta je určená pro výroby s instalovaným výkonem 100 kW až 1 MW. Pravidla pro paralelní chod výroben se sítí distribuční soustavy jsou pro různé výkonové kategorie odlišná a práce se proto bude věnovat pouze požadavkům na výroby kategorie B1. Projektová dokumentace bude vytvořena v souladu s vyhláškou č. 499/2006 Sb. o dokumentaci staveb. Na závěr bude provedena počítačová simulace energetických výnosů výroby a na jejím základě bude provedeno ekonomické zhodnocení investice.

1. POŽADAVKY PDS NA VÝROBNY KATEGORIE B1

Základním dokumentem, který stanovuje požadavky na výroby připojené do distribuční soustavy, jsou Pravidla provozování distribučních soustav, navazující na Pravidla provozování přenosové soustavy. Předpisy vydané v tomto dokumentu jsou schvalovány Energetickým regulačním úřadem a vycházejí z energetického zákona.

Cílem této kapitoly je shrnout předpisy, nařízení a doporučení, které se týkají výroben kategorie B1. Do této kategorie spadají výrobní moduly s instalovaným výkonem od 100 kW do 1 MW.

1.1 Podmínky chování výroby v síti

Při paralelním provozu s distribuční soustavou se výroba stává prvkem ovlivňujícím napěťové a frekvenční poměry v síti. Z tohoto důvodu musí reagovat na změny stavu sítě a vhodným způsobem se podílet se na udržování stability. Základní požadavky na autonomní regulační funkce a frekvenční a napěťové ochrany výroben jsou stanoveny přílohou č.4 PPDS.

1.1.1 Požadavky na automatické funkce střídačů

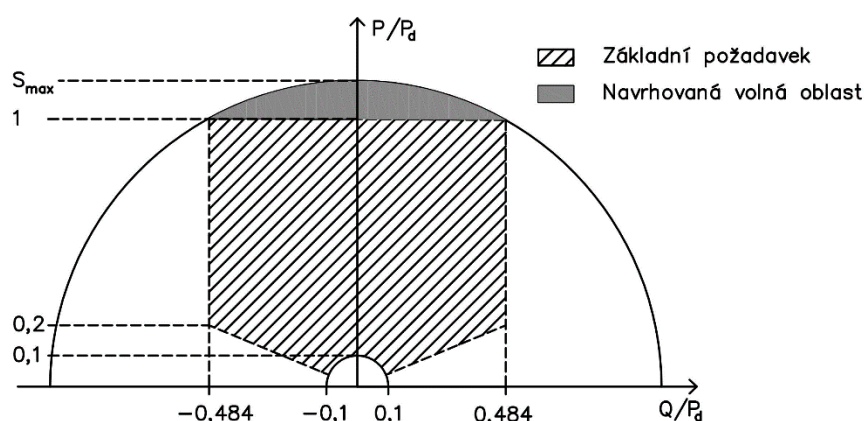
V případě FVE zajišťují dodržování podmínek chování výroben v síti střídače. Vzhledem k principu jejich funkce je možné nastavit jejich vhodnou odezvu na provozní veličiny ES. V tab. 1.1 je uveden výčet požadavků na regulační funkce střídačů. Jejich podrobný popis lze nalézt v nařízeních [2] a [3].

č. požadavku	Požadavek
1	Rozsah frekvence a rychlost změny frekvence
2	Regulace a dodávka jalového výkonu
3	Regulace a dodávka činného výkonu
4	Opětovné připojení po poruše
5	Překlenutí poklesu napětí (dynamická podpora sítě)
6	Emise harmonických

tab. 1.1 Výčet požadavků na funkce střídačů z hlediska podpory sítě [2] [3]

1.1.2 Regulace jalového výkonu

Střídače jsou schopné dodávat jalový výkon induktivního i kapacitního charakteru. PDS toho využívají k řízení napětí v síti a nařizují tak výrobním splnění určitých požadavků, týkajících se regulace jalového výkonu. PQ diagram povinného i nepovinného rozsahu dodávky jalového výkonu při připojení VM do sítě VN je na obr. 1.1.



obr. 1.1 PQ diagram povinné dodávky jalového výkonu dle [2]

Meze pro dodávku jalového výkonu, které smí distributor využít, jsou dle uvedeného diagramu $\pm 0,484P_D$, což odpovídá rozsahu účinníku $\cos\varphi = 0,9$ induktivního charakteru po $\cos\varphi = 0,9$ kapacitního charakteru, kdy P_D je návrhový výkon výroby. Z diagramu je také patrné, že distributor musí mít možnost odebrat jalový výkon o velikosti $Q = \pm 0,484P_D$ již při dodávce činného výkonu o velikosti pouze $0,2P_D$. Platí také, že při poruše musí VM prioritně dodávat jalový výkon před činným.

Způsoby řízení jalového výkonu jsou dle [2] následující:

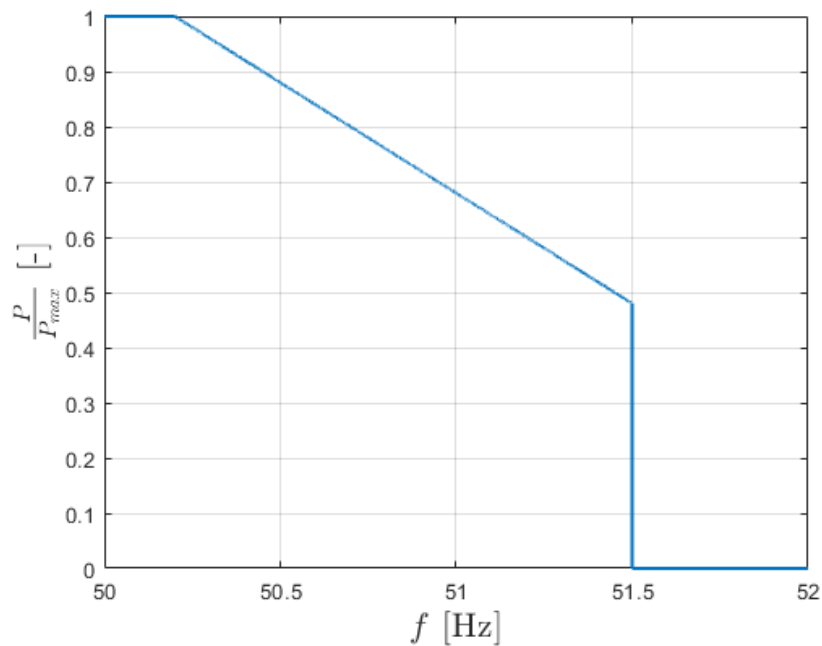
- | | |
|---|---------------------|
| a) Pevná hodnota jalového výkonu | Q_{fix} |
| b) Hodnota jalového výkonu závislá na napětí | $Q(U)$ |
| c) Hodnota jalového výkonu závislá na činném výkonu | $Q(P)$ |
| d) Pevná hodnota účinníku | $\cos\varphi_{fix}$ |
| e) Hodnota účinníku závislá na napětí | $\cos\varphi(U)$ |
| f) Hodnota účinníku závislá na činném výkonu | $\cos\varphi(P)$ |
| g) Zadaná hodnota napětí | U |

Zvolený způsob řízení a žádané hodnoty zadává PDS. Při zadávání se vychází také z technických možností daného VM [2]. Vzhledem k decentralizaci zdrojů je trendem používat řízení jalového výkonu v závislosti na napětí $Q(U)$.

1.1.3 Regulace činného výkonu

Pro všechny výroby platí, že musí být schopny regulovat dodávaný činný výkon v závislosti na frekvenci v síti. Řízení výkonu, případně odpojení výroby, musí být prováděno jak automaticky, tak podle povelů dispečinku PDS.

Snižování činného výkonu při nadfrekvenci je řízeno statikou, kterou stanoví provozovatel přenosové soustavy. Nastavení statiky musí být mezi 4 % a 10 % s prahovou hodnotou frekvence $50,05 < f \leq 50,5$ Hz. V ČR je defaultní prahová frekvence $f = 50,2$ Hz a statika $s_2 = 5$ %, viz obr. 1.2. Činný výkon může být po omezení vzrůstem frekvence nad prahovou hodnotu opět zvyšován až po poklesu frekvence zpět pod prahovou hodnotu. Tzn., že po křivce se lze pohybovat pouze jedním směrem. Při $f \geq 51,5$ Hz klesá výkon na nulu, kvůli zapůsobení nadfrekvenční ochrany, viz kapitola 1.2.4.



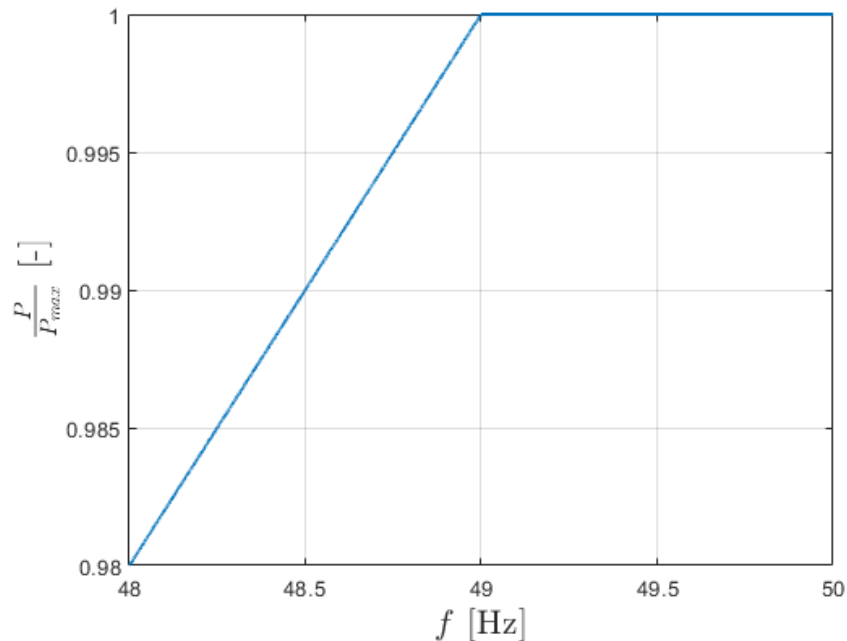
obr. 1.2 Omezení činného výkonu při nadfrekvenci dle [2]

Výrobná musí být vybavena rozhraním pro přijetí pokynu PDS o snížení činného výkonu. Dle [4] má PDS právo omezit činný výkon na výstupu výrobní v těchto stavech [2]:

- potenciální ohrožení bezpečného provozu systému
- stavu blackoutu nebo stavu obnovy
- nutné provozní práce, popř. nebezpečí přetížení v síti PDS
- nebezpečí vzniku ostrovního provozu
- ohrožení statické nebo dynamické stability
- vzrůst frekvence ohrožující systém
- údržba nebo provádění stavebních prací na zařízení DS nebo v jeho blízkosti

Výrobný musí být schopný regulovat činný výkon s minimálním gradientem $0,02P_{max}/\text{min}$, maximálně však $0,4P_{max}/\text{min}$ [3].

Při podfrekvenci nesmí být pokles činného výkonu výrobný větší než $0,02 \cdot P_{max}/\text{Hz}$ viz obr. 1.3. Tato podmínka zabraňuje prohlubování výkonového deficitu v síti.



obr. 1.3 Maximální přípustné snížení činného výkonu při nadfrekvenci dle [2]

U výroben připojených do DS na hladině NN je požadováno vybavit generátory funkcí pro řízení činného výkonu v závislosti na napětí $P(U)$. Toto řízení se používá, aby se zabránilo odpojování výroben nadpětovými ochranami.

1.1.4 Zpětné vlivy na napájecí síť

Při určování zpětných vlivů na síť se vychází z impedance sítě v místě připojení. Ta ovlivňuje odolnost sítě proti šíření rušení. U výroben se sleduje flickr, emise harmonických frekvenčních složek a vliv na HDO.

Vzhledem k podstatě získávání energie ze slunečního záření je zřejmé, že změna osvětlení panelu vede k okamžité změně velikosti jeho výkonu. Zastínění panelů vyvolané pohybujícími se mraky tak způsobuje fluktuace výstupního výkonu výrobný, které může mít za následek kolísání napětí [5]. Změna napětí ve společném napájecím bodě, vyvolávající flickr, může být maximálně $\Delta U \leq 0,03U_n$.

Střídače pracují na principu pulzně šířkové modulace a emitují tak harmonické složky proudu. Pro stanovení limitů přípustných harmonických proudů je v PPDS použit vztahový proud harmonických

$$i_{\mu,př} = \frac{I_{\mu,př}}{S_{kV}} \left[\frac{A}{MVA} \right], \quad (1.1)$$

kde $I_{\mu,př}$ je absolutní velikost proudu [A] a

S_{kV} je výkon výroby [MVA].

Maximální hodnota $i_{vpř}$ je různá pro různé řady harmonických frekvencí a napěťové hladiny sítě, viz tab. 1.2. V tabulce nejsou uvedeny liché harmonické, jejichž řád je násobkem 3, protože jsou doménou nulové složky. Sít' VN je provozována bez středního vodiče, a tudíž se zde 3. harmonická a její násobky neobjeví.

Výroby se statickými střídači nemají výrazný vliv na úroveň signálu HDO. Může však dojít k sériové rezonanci mezi filtračními či kompenzačními prvky výroby a transformátorem na frekvenci blízké vysílací frekvenci HDO [2]. V takovém případě je potřeba ověřit, že útlum signálu HDO není mimo přípustné meze PPDS.

Řád harmonické μ, ν	Přípustný vztahový proud $i_{\mu,př}$ [A/MVA]		
	sít' 10 kV	sít' 20 kV	sít' 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/ ν	0,03/ ν	0,017/ ν
$\mu < 40$	0,06/ μ	0,03/ μ	0,017/ μ
$\mu > 40$	0,16/ μ	0,09/ μ	0,046/ μ

tab. 1.2 Přípustné vztahové proudy harmonických [2]

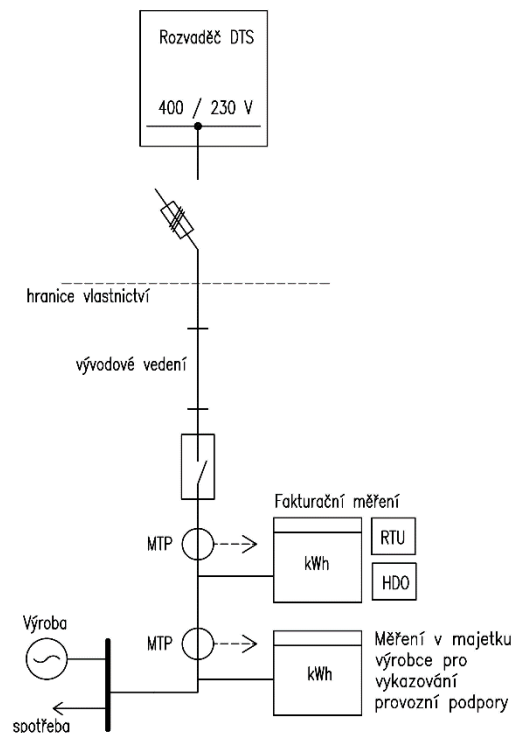
1.2 Rozpadové místo

Připojení výroby k síti je prováděno přes tzv. rozpadové místo. V tomto místě je měřena elektrická energie a je zde spínací zařízení s patřičně nastavenými ochranami.

1.2.1 Schémata připojení k síti

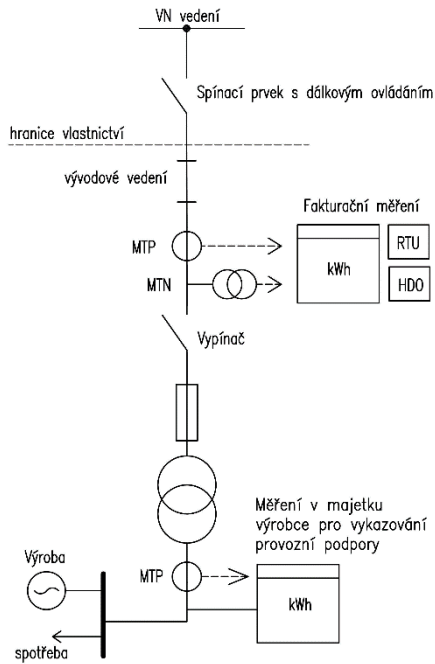
Výrobní kategorie B1 se zpravidla připojují do napěťové hladiny VN, výjimečně pak do NN. Požadavky na provedení rozpadového místa se mohou lišit v závislosti na napěťové hladině, do které je výroba připojena.

Schéma připojení výroby do hladiny NN je na obr. 1.4. Připojení výroben kategorie B1 do sítě NN je, vzhledem k velikosti výkonu, možné pouze do rozváděče NN v distribuční trafostanici. Fakturační měření může být provedeno jako polopřímé nebo nepřímé.

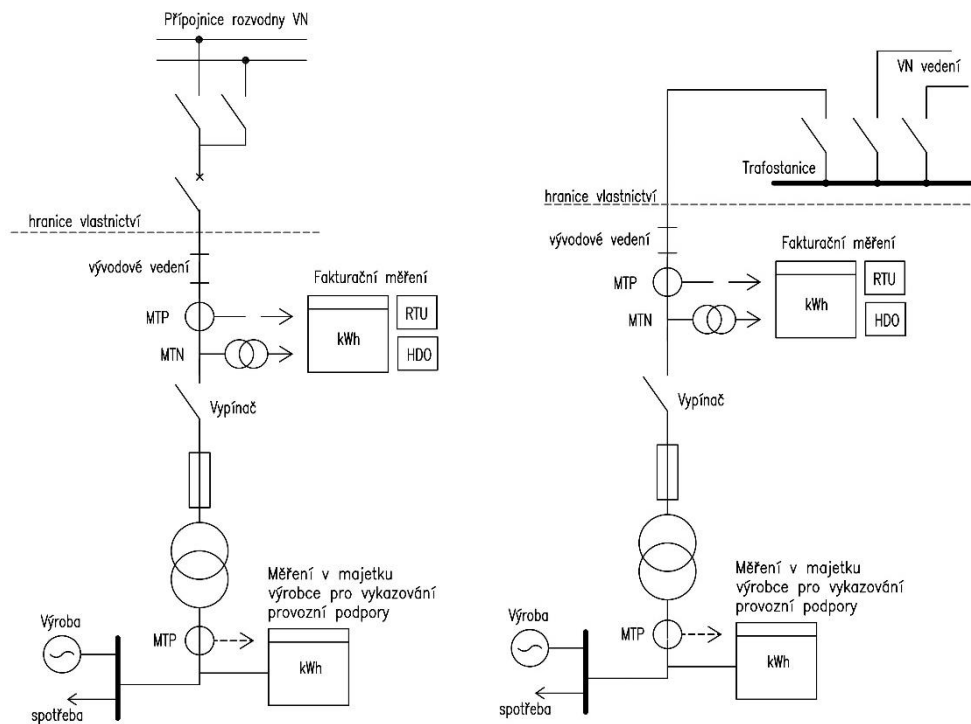


obr. 1.4 Schéma připojení do NN

Připojení do sítě VN lze provést buď připojením přímo na vedení, do rozvodny nebo zasmyčkováním do vedení. Na obr. 1.5 je schéma připojení výroby přímo na vedení VN. Před připojením na vedení je instalován spínací prvek s dálkovým ovládním, který je v majetku PDS. Vypínač musí být vybaven dálkovým ovládním a signalizací stavu [2]. Na obr. 1.6 jsou schémata připojení do rozvodny VN a zasmyčkováním do vedení.



obr. 1.5 Schéma připojení na vedení VN



obr. 1.6 Schéma připojení do rozvodny VN (vlevo) a zasmyčkováním do vedení (vpravo)

1.2.2 Fakturační měření

Pro měření se u výroben kategorie B1, používá způsob měření nepřímo, nebo polopřímo. V případě polopřímého měření se používá měřicího transformátoru proudu. V případě nepřímého měření je použit měřicí transformátor proudu i měřicí transformátor napětí. V případě připojení výrobní do NN se používá polopřímého měření. Při připojení výrobní do VN je do výkonu transformátoru 630 kVA včetně použito měření polopřímé, umístěné na sekundární straně. Nad 630 kVA se elektroměr umísťuje na primární stranu výkonového transformátoru a měření je provedeno nepřímo [2].

1.2.3 Spínací zařízení

Výrobní je od sítě oddělena vazebním spínačem. Spínač musí být schopen vypínat pod zatížením a lze ho umístit jak na stranu NN, tak VN. Musí mu však být předřazena zkratová ochrana. Dále musí být vybaven dálkovým ovládním a signalizací stavu.

1.2.4 Nastavení ochran

Tato podkapitola se nebude zabývat vlastními ochranami výrobní, ale pouze nastavení ochran rozpadového místa ve vazbě na distribuční soustavu. Tyto se týkají nadpětí, podpětí, nadfrekvence a podfrekvence, viz tab. 1.3. Při nastavování ochran je třeba dodržet zásady statické a dynamické podpory sítě. V tab. 1.3 lze vidět, že doporučené vypínací časy se zkracují s velikostí přepětí/podpětí, důvodem je právě návaznost na podporu sítě. Dále je nutné zajistit koordinaci ochran se systémem OZ.

funkce	rozsah nastavení	doporučené nastavení ochrany	
nadpětí 3. stupeň	1 - 1,3 U_n	1,25 U_n	0,1 s
nadpětí 2. stupeň	1 - 1,3 U_n	1,2 U_n	5 s
nadpětí 1. stupeň	1 - 1,3 U_n	1,15 U_n	≤ 60 s
podpětí 1. stupeň	0,1 - 1 U_n	0,7 U_n	0 – 2,7 s
podpětí 2. stupeň	0,1 - 1 U_n	0,3 U_n	$\geq 0,15$ s
nadfrekvence	50 - 52 Hz	51,5 Hz	≤ 100 ms
podfrekvence	47 - 50 Hz	47,5 Hz	≤ 100 ms
směr jalového výkonu a podpětí	0,7 - 1 U_n	0,85 U_n	$t_l = 0,5$ s

tab. 1.3 Parametry pro nastavení ochran rozpadového místa [2]

1.3 Dálkové řízení a výměna dat

Požadavky na chování výroben v síti dle kapitoly 1.1 by měly být splněny autonomně, bez nutnosti zásahu. Těmito funkcím jsou však nadřazeny povely dispečinku PDS. Na základě těchto povelů musí být výrobní schopna řídit spínač s oddělovací funkcí a regulovat činný a jalový výkon.

Dále je třeba, aby byla výrobná vybavena rozhraním pro přenos dat, která PDS využívá pro analýzu a řízení sítě.

1.3.1 Požadavky na výměnu dat

Dle PPDS musí být výrobnou na dispečink v reálném čase odesílána data obsahující následující naměřené hodnoty:

- činný výkon P ,
- jalový výkon Q ,
- proud jedné fáze I_{1f} ,
- maximální rychlost,
- diagramový bod,
- svorkové napětí,
- vlastní spotřeba P a Q ,
- netto P a Q do DS,
- potvrzení o přijetí zadané hodnoty.

Dále je nutné odesílat tyto signály:

- stavy vypínače, odpojovače a zemniče,
- zapůsobení frekvenčního relé,
- ovládání místně/dálkově,
- provoz v regulaci výkonu,
- provoz v regulaci frekvence,
- přechod na nový diagramový bod,
- způsob napájení vlastní spotřeby,

a přijímat tyto hodnoty:

- zadaný činný výkon P ,
- zadaný jalový výkon Q ,
- napětí,
- účinník,
- omezení činného výkonu.

1.3.2 Komunikační zařízení

Nároky lokálních provozovatelů distribučních soustav na provedení komunikačního zařízení jsou rozdílné. Přijímání povelů z dispečinku je provedeno přijímačem HDO, nebo IP komunikační jednotkou. Předávání požadovaných dat na dispečink je provedeno přes IP komunikační jednotku smluveným komunikačním protokolem.

HDO je využíváno pro optimalizaci aktuálního provozního stavu soustavy a zvyšování její prostupnosti i pro odlehčování soustavy ve stavu nouze [6]. Z hlediska FV vyroben je důležité zejména pro příjem povelů při poskytování systémových a podpůrných služeb. HDO přijímače používané ve FV výrobnách jsou vícepovelové.

Obvykle dokážou přijímat signál a povelovat pouze k omezení činného výkonu. Samotný HDO přijímač proto není pro řízení výroby kategorie B1 dostatečný.

Jako IP komunikační jednotka je využívána RTU jednotka. Toto zařízení obsahuje řídicí procesorovou jednotku, komunikační modul, programovatelné logické funkce a digitální i analogové vstupy. Zároveň slouží pro ukládání dat z měření provozních veličin. Zpravidla jsou jednotky vybavené i vstupy pro připojení přímo na sekundární vinutí měřicích proudových transformátorů. Paleta dostupných komunikačních rozhraní pro komunikaci s nadřazeným systémem je poměrně široká a liší se dle výrobců. Obecně je to však jakákoliv síť založená na IP komunikaci. Pro bezdrátovou komunikaci je to pak GSM a LTE [7].

1.4 Srovnání požadavků jednotlivých PDS v ČR

Podmínky pro připojení všech provozovatelů distribučních soustav v ČR, jmenovitě EG.D, ČEZ distribuce a PREdistribuce, jsou stejné. V rámci rešerše nebyly z veřejně dostupných materiálů zjištěny žádné rozdíly v požadavcích jednotlivých PDS.

PPDS však v některých oblastech není zcela konkrétní a ponechává prostor pro volbu vhodného technického řešení na provozovateli výroby a PDS. Jmenovitě je to například nastavení ochran, statika omezení činného výkonu při nadfrekvenci nebo způsob řízení jalového výkonu.

V podkapitole 1.1.2 byly jmenovány možné způsoby řízení jalového výkonu. Dle [15] se pro FVE připojované do distribuční sítě ČEZ distribuce využívá regulace jalového výkonu na konstantní napětí v místě připojení. Řízení je provedeno místní automatikou, která obdrží zadané napětí z dispečinku. Při připojení do distribuční sítě EG.D je jalový výkon regulován na konstantní účinník. U PREdistribuce se způsob řízení jalového výkonu nepodařilo zjistit. Přístup distributorů k řízení Q však závisí na jejich aktuální koncepci řízení napětí a může se lišit i dle síťových poměrů v místě instalace.

2. NÁVRH VÝROBNY

Pro získání základní představy o možnostech výroby je nejprve nutné analyzovat místo instalace. Prostorové možnosti pro instalaci panelů limitují instalovaný výkon a uspořádání výroby. Na jejich základě je pak volena vhodná technologie střídačů, ochran, ale i komunikačních zařízení.

2.1 Analýza objektů

Vstupy pro analýzu byly stavební výkresy půdorysů střech jednotlivých objektů, katastrální mapa, místní zkoumání a měření a satelitní snímky z programu Google Earth Pro.

Předmětné objekty pro návrh FV výroben jsou součástí areálu FEKT VUT v Brně. Konkrétně se jedná o 3 objekty T12, T10 a T8. Všechny mají plochou střechu. Objekt T12 se skládá z více budov. Jednotlivé budovy mají rozdílnou výšku a pro instalaci panelů jsou použitelné 2 z těchto budov, konkrétně C a D. Ostatní jsou buď nízké a zastíněné ostatními budovami, nebo je instalace panelů nevhodná kvůli stávajícím technologickým zařízením, jako jsou antény či vzduchotechnika. Na obr. 2.1 je jižní pohled na T12, zleva budovy C, D a E. Azimut jihovýchodní strany objektu byl určen z katastrální mapy a následně byl z Křovákova zobrazení přepočten na skutečný azimut $\gamma = 153,8^\circ$. Roční suma globálního záření v lokalitě objektů je $1\,130\text{ kWh/m}^2$ a roční průměrná teplota je $10\text{ }^\circ\text{C}$.



obr. 2.1 Jižní pohled na objekt T12 [14]

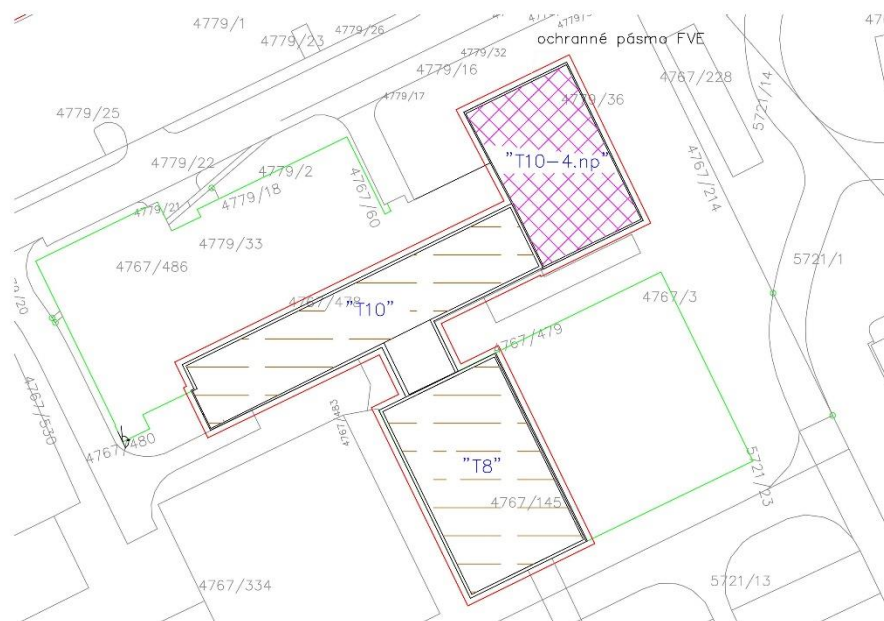


obr. 2.2 Půdorysy střech budov C a D objektu T12 v katastrální mapě

Na obr. 2.3 je pohled na objekty T10 a T8. Z pohledu je patrné, že pro instalaci panelů jsou vhodné střechy objektů T8 a T10 nad 7.np a střecha objektu T10 nad 4.np. Orientace objektů je stejná jako v případě T12.



obr. 2.3 Jižní pohled na objekty T8 a T10 [14]



obr. 2.4 Půdorys střech objektů T8 a T10 v katastrální mapě

Střechy jsou v případě T12 a T10 pokryty kačírkiem. Střecha objektu T8 je pokryta fólií. Všechny objekty mají mřížovou jímací soustavu.

Na základě analýzy objektů a místní prohlídky bude výrobní složena ze 3 dílčích výroben. Výrobní č.1 bude umístěna na střeších objektů T8 a T10, výrobní č.2 bude umístěna na střeše nad 4.np severovýchodní části objektu T10 a výrobní č. 3 bude na střeších budov C a D objektu T12.

Celý areál VUT je napájen společným VN vývodem z rozvodny Medlánky. K areálu patří i koleje, jídelny, obchod a sportoviště nacházející se v objektech pod Palackého vrchem. Vzhledem k velikosti odběru na tomto vývodu bude předmětná výrobní krýt spotřebu areálu a neočekává se významný přetok energie do sítě.

2.2 Vymezení prostoru pro instalaci panelů

Prostor pro instalaci panelů na střeších budov je omezen především stávajícím technickým vybavením, vnějším LPS a zastíněním. Odstupy od technického vybavení mohou být určeny na základě PBŘ. Také je nutné ponechat dostatečný odstup, aby byla zachována možnost manipulace a údržby. V místech s pravidelným zastíněním není vhodné panely instalovat, protože to vnáší nesoulad do stringu, což negativně ovlivňuje výstupní výkon.

Nutný odstup od vnějšího LPS je dán izolační vzdáleností jímací soustavy a svodů. Jejím stanovením se zabývá norma ČSN EN 62305-3 ed.2. V následující podkapitole bude proveden praktický výpočet.

2.2.1 Výpočet dostatečné vzdálenosti pro dosažení elektrické izolace vnějšího LPS

Norma ČSN EN 62305-3 ed.2. definuje tzv. dostatečnou vzdálenost s , která zajistí dosažení elektrické izolace vnějšího LPS. Její podrobný výpočet bude proveden pro budovu C objektu T12. U této budovy je předpokládán nejhorší případ vzhledem k její výšce. Pro ostatní objekty je pro zjednodušení uvažována stejná hodnota s rezervou.

Dostatečná vzdálenost s není pouze jedno univerzální číslo, ale stanovuje se vždy pro určité zkoumané místo. Pro mřížovou jímací soustavu se soustavou mnoha svodů, která je instalována na všech předmětných objektech se dostatečná vzdálenost s vypočítá dle vzorce

$$s = k_i \cdot (k_{c1} \cdot l_1 + k_{c2} \cdot l_2 + \dots + k_{cn} \cdot l_n), \quad (2.1)$$

kde k_i je koeficient závislý na zvolené třídě LPS,

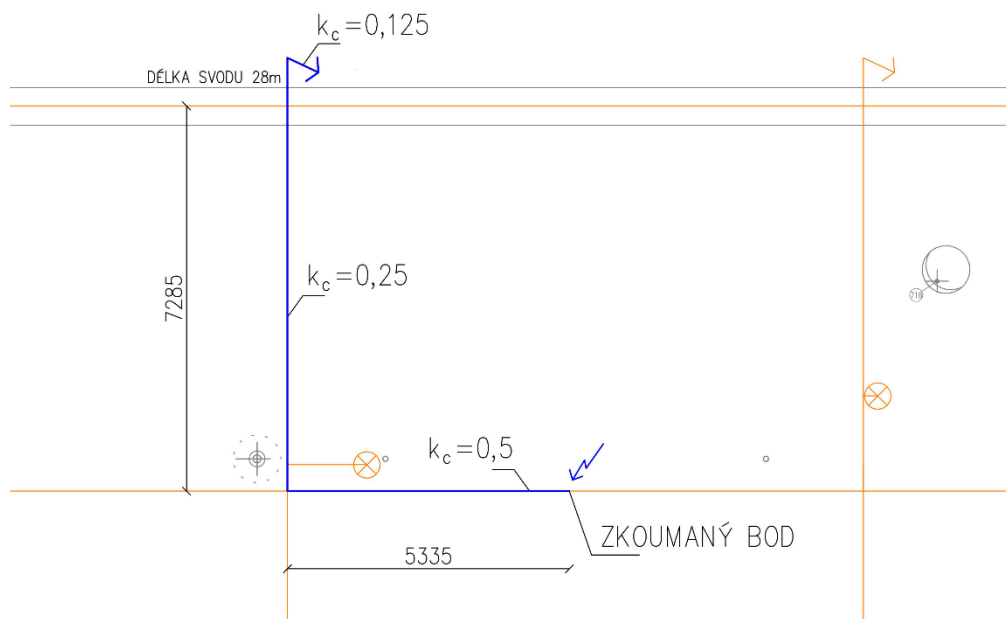
k_c je koeficient závislý na bleskovém proudu tekoucím jímací soustavou a svody a l je délka v metrech podél jímací soustavy a svodu.

Prvním krokem je určení potřebných koeficientů. Koeficient k_i závisí na zvolené třídě LPS dle tab. 2.1. Třída LPS předmětného objektu byla dle konstrukce jímací soustavy a příkladů uvedených v [16] stanovena jako II. Třídě II odpovídá koeficient $k_i = 0,06$.

Třída LPS	k_i
I	0,08
II	0,06
III a IV	0,04

tab. 2.1 Hodnoty koeficientu k_i

Pro mřížovou jímací soustavu se soustavou mnoha svodů se hodnoty koeficientu k_c určí dle přílohy C normy [17]. V místě vniknutí se bleskový proud rozdělí počtem možných proudových cest a v místě každého spoje se zmenšuje o 50 %. V místě svodu se proud zase zmenšuje o 50 % až do minimální hodnoty $\frac{1}{n}$, kde n je počet svodů. Na obr. 2.5 je část půdorysu střechy budovy C objektu T12 s vyznačenou jímací soustavou a svody. Na obrázku jsou také vyznačeny koeficienty k_c . Počet svodů je $n = 10$.



obr. 2.5 Část půdorysu střechy s vyznačenou jímací soustavou

Dosažením koeficientů a vzdáleností do rovnice (2.1) dostáváme pro vzdálenost s

$$s = k_i \cdot (k_{c1} \cdot l_1 + k_{c2} \cdot l_2 + k_{c3} \cdot l_3) = 0,06 \cdot (0,5 \cdot 5,3 + 0,25 \cdot 7,3 + 28 \cdot 0,125) = 0,48 \text{ m.} \quad (2.2)$$

Výpočet byl proveden pro nejnepříznivější místo, ve kterém vzdálenost s vyjde největší. Pro další postup bude počítáno s minimálním odstupem od vnějšího LPS $s = 0,5 \text{ m}$.

2.3 Fotovoltaické panely

Účinnost panelů, které jsou v dnešní době dostupné na trhu, se pohybuje mezi 19 a 22 %. Panely jsou k dostání s maximálním výkonem od cca 100 až 500 W_p , v závislosti na použité technologii a velikosti panelu. Výhodou větších panelů je úspora prostoru a nižší náklady na montáž a kotvení, nevýhodami jsou pak složitější manipulace a větší ztráty v případě defektu. Větší panely mohou být také více namáhány větrem a sněhem.

Pro návrh výroby byly použity panely Longi LR5-54 HPH 415 M s účinností 21,8 %. Jejich výkon je 415 W_p a mají rozměry 1722x1134x30 mm. Tento typ panelu byl vybrán pro jeho vysokou účinnost a dostupnost na trhu.

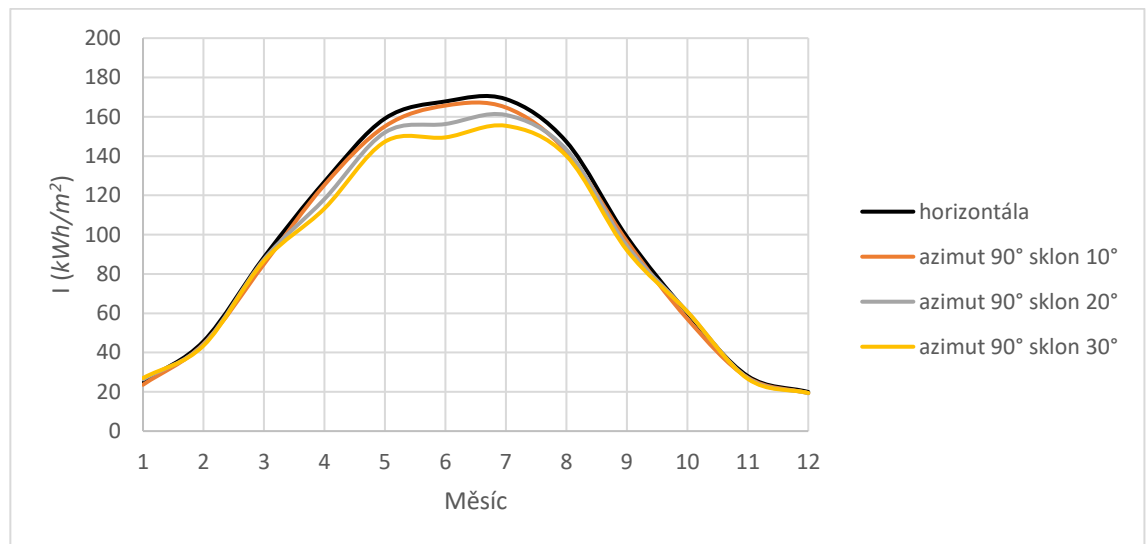
2.3.1 Orientace a sklon

V našich podmínkách jsou nejčastěji používána dvě základní uspořádání panelů. Prvním jsou panely otočené na jih se sklonem 25-35°. Druhou používanou variantou je východo-západní (dále jen V-Z) orientace s úhlem sklonu okolo 10°. V případě jižní orientace lze

z panelů získat větší roční výnos v poměru k instalovanému výkonu než v případě V-Z orientace. Výhodou V-Z orientace je zase možnost instalace většího počtu panelů na jednotku plochy. Důvodem je, že u V-Z uspořádání nejsou nutné rozestupy panelů kvůli stínění.

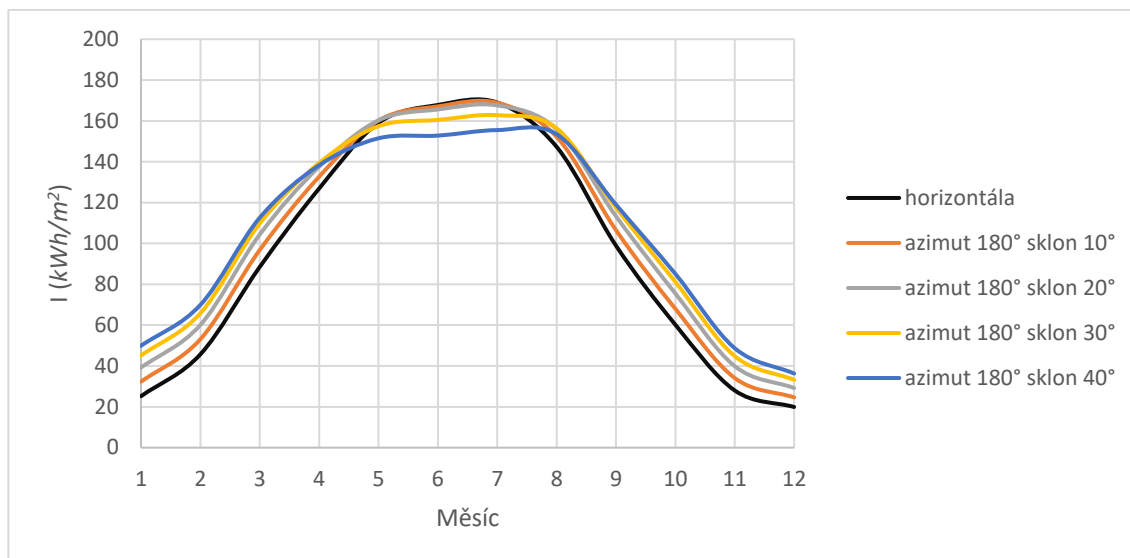
Pro názornost byly ve výpočtovém programu PV*SOL provedeny simulace intenzity záření na plochu panelu pro různé orientace a sklony panelu v průběhu roku. Lokalita pro simulace je město Brno.

Z grafu na obr. 2.6 je patrné, že při V-Z orientaci je optimální mít sklon panelů co nejmenší. Instalace s malým sklonem má však svá úskalí jako je znečištění, déle trvající sněhové pokrytí apod.



obr. 2.6 Intenzita záření v průběhu roku – východní orientace

V případě jižní orientace zvyšující se sklon snižuje intenzitu dopadajícího záření v letních měsících, ale zvyšuje ji na jaře, na podzim a v zimě, viz obr. 2.7. Vyrovnání výnosu v letních a zimních měsících je pro fotovoltaické výroby žádoucí. Zvyšující se sklon panelů však znamená nutnost větších rozestupů mezi jednotlivými řadami vlivem stínění, čímž se sníží instalovaný výkon na dané ploše.



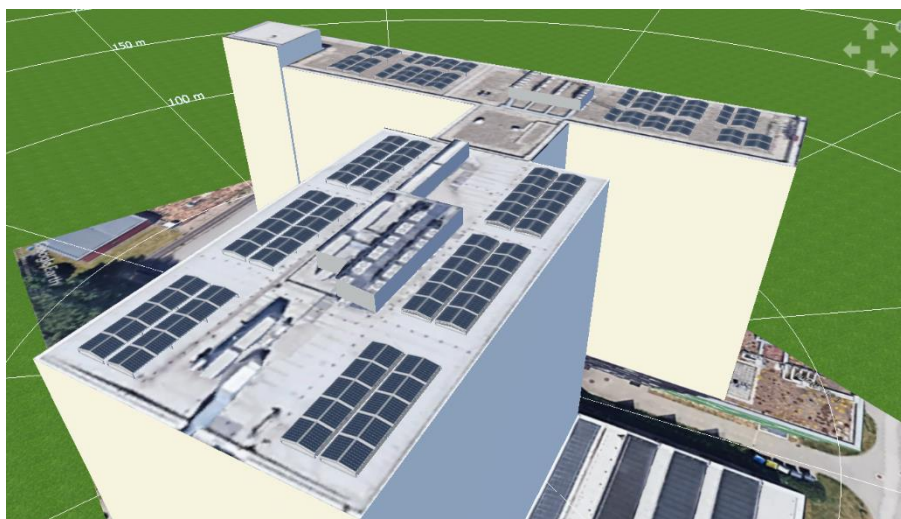
obr. 2.7 Intenzita záření v průběhu roku – jižní orientace

2.3.2 Srovnání vyrobené energie pro dva typy uspořádání

Na základě předchozí kapitoly budou v programu PV*SOL simulována dvě různá uspořádání panelů a následně bude provedeno srovnání vyrobené energie při daných uspořádáních. Konkrétně bude simulováno jižní uspořádání se sklonem $\beta_j = 30^\circ$ a V-Z se sklonem $\beta_{v-z} = 10^\circ$. Jednotlivé řady panelů budou zarovnány hranami budovy. Pro jižní uspořádání to znamená azimut $\gamma_j = 153^\circ$ a pro východní $\gamma_v = 63^\circ$. Při návrhu jižního uspořádání byly rozestupy jednotlivých řad panelů vypočítány pro nulové zastínění v 11:00 v den zimního slunovratu. Na obr. 2.8 a obr. 2.9 jsou ukázky rozmístění panelů pro různá uspořádání vytvořené v programu PV*SOL.



obr. 2.8 Objekt T8+T10 jižní uspořádání



obr. 2.9 Objekt T8+T10 V-Z uspořádání

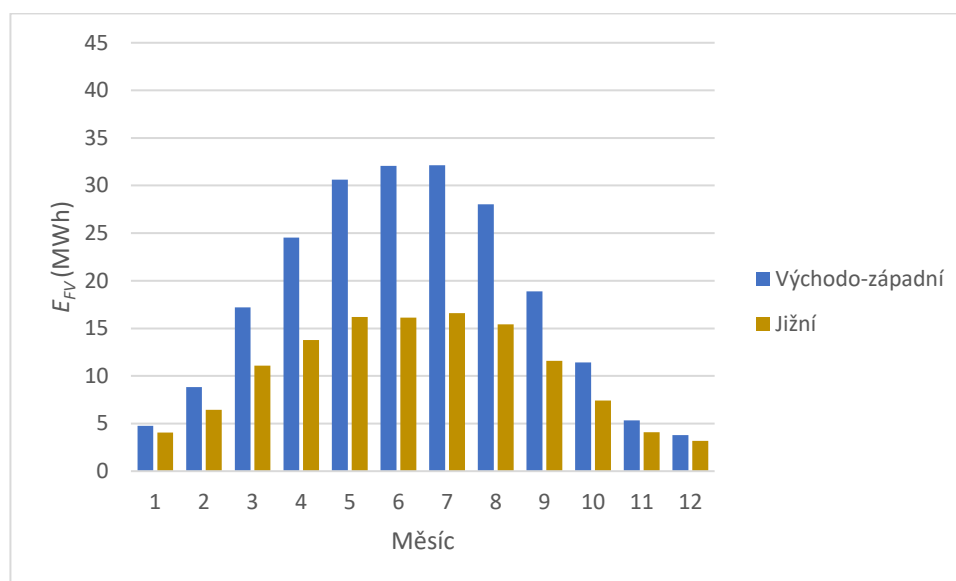
V tab. 2.2 je srovnání jižního a V-Z uspořádání dle jednotlivých objektů. Je nutné podotknout, že roční vyrobená energie je energie na DC straně počítaná beze ztrát na kabeláži a beze ztrát měničů. Nejedná se o roční energetický výnos celého systému, ale pouze o energetický potenciál daného uspořádání panelů. Při použití V-Z uspořádání je vyrobená energie přepočtená jednotku instalovaného výkonu o 10 % nižší oproti jižní orientaci. Díky úspoře místa na rozestupech je však díky V-Z orientaci možné na objekty instalovat více než 2x větší výkon a zvýšit roční vyrobenou energii cca 1,8x oproti jižnímu uspořádání.

objekt	uspořádání	počet panelů (ks)	instalovaný výkon (kW _p)	vyrobená energie (MWh/rok)	vyrobená energie přepočtená na 1 kW _p instalovaného výkonu (kWh/kW _p)
T8+T10	V-Z	243	100,8	104,97	1,041
	Jižní	120	49,8	56,62	1,137
T10-4.np	V-Z	48	19,9	21,56	1,082
	Jižní	25	10,4	12,89	1,242
T12	V-Z	199	82,6	91,12	1,103
	Jižní	109	45,2	56,44	1,248
celkem	V-Z	490	203,4	217,65	1,070
	Jižní	242	100,4	125,95	1,195

tab. 2.2 Porovnání roční vyrobené energie a instalovaného výkonu pro různá uspořádání

Na obr. 2.10 je vidět vyrovnanější výnos jižního uspořádání v průběhu roku popisovaný v předchozí kapitole. V zimních měsících se vyrobená energie obou uspořádání neliší v takové míře jako v období letním. Vzhledem k vyšším energetickým výnosům z FV instalace na objektech bylo zvoleno V-Z uspořádání. Vyrobená energie

přepočtená na jednotku instalovaného výkonu bude sice nižší, což znamená i nižší účinnost systému, ale plochy střech budou lépe využity.

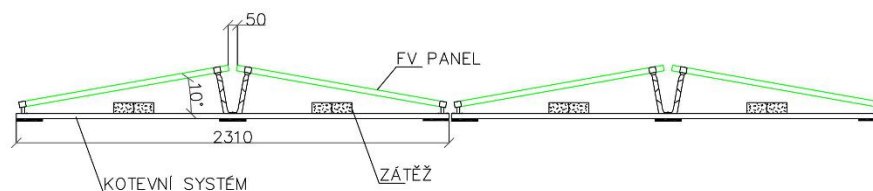


obr. 2.10 Porovnání vyrobené energie v jednotlivých měsících pro různá uspořádání

2.3.3 Nosné konstrukce

Způsob provedení kotvicích systému se liší dle místa montáže a sklonu panelu. Pro ploché střechy se používají hliníkové konstrukce nebo plastové vany zatěžkané dlaždicemi či štěrkem. Při návrhu kotvicího systému je nutné brát do úvahy i venkovní vlivy a nosnost a materiál střechy. V našem případě budou panely instalovány na ploché střechy ve V-Z orientaci se sklonem 10° . Povrch střech je buď fólie, nebo kačírek. V případě fólie je nutné chránit ji proti protržení.

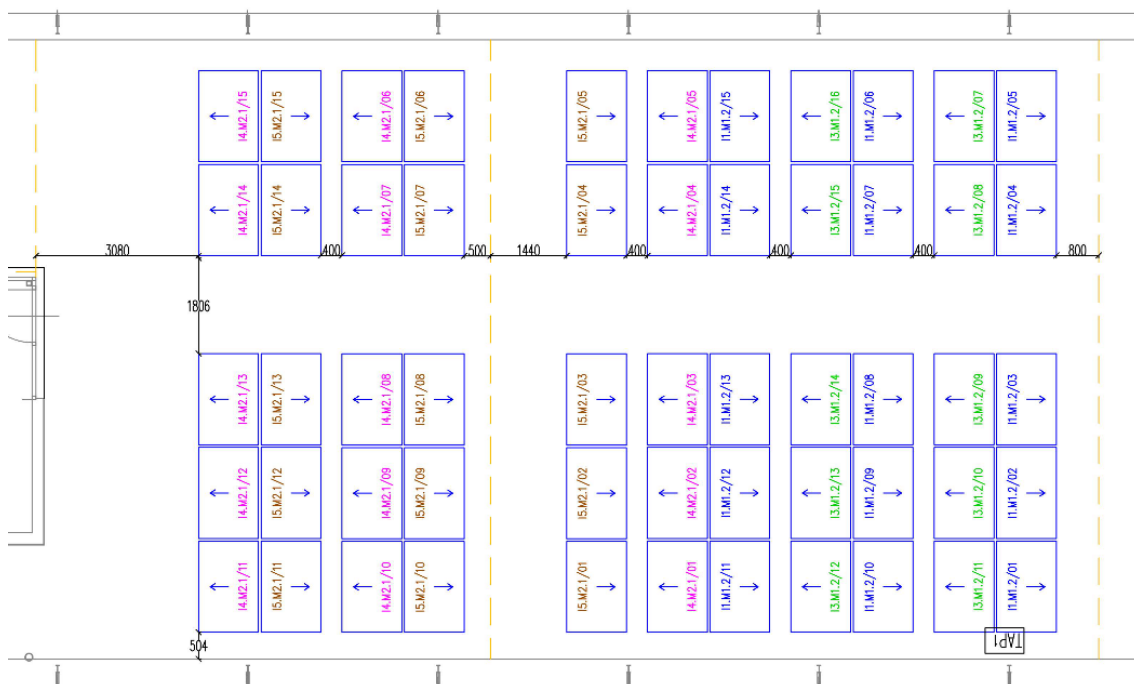
Pro projekt byly vybrány nosné konstrukce Dome 6 od formy K2. Nabízí se ve variantách pro všechny typy plochých střech a jsou kompatibilní s použitými panely. Jsou dodávány s fixním sklonem 10° a vynikají jednoduchostí montáže na podélné lišty. Firma také poskytuje software K2 BASE pro konfiguraci nosných konstrukcí, jejímž výstupem je soupis použitého materiálu. Software také zajistí kontrolu vhodnosti vybrané konstrukce pro požadovanou aplikaci. V tomto softwaru byl návrh proveden.



obr. 2.11 Nosná konstrukce panelů při V-Z uspořádání

2.3.4 Uspořádání panelů a celkový instalovaný výkon

Při umísťování panelů a nosných konstrukcí byla respektována ostatní technologická zařízení a vnější LPS viz kapitola 2.2.1. Na obr. 2.12 je příklad uspořádání panelů na části objektu T10.



obr. 2.12 Rozmístění panelů- část střechy T10

V elektronické příloze jsou k nahlédnutí kompletní výkresy rozmístění panelů na všech předmětných objektech. Pro tvorbu výkresů byl použit program ProgeCAD. V tab. 2.3 jsou uvedeny počty panelů a instalovaný výkon dílčích výroben.

výrobna	počet panelů (ks)	instalovaný výkon panelů (Wp)
T8+T10 (výrobna č.1)	243	100 845
T10-4.np (výrobna č.2)	48	19 920
T12 (výrobna č.3)	199	82 585
celkem	490	203 350

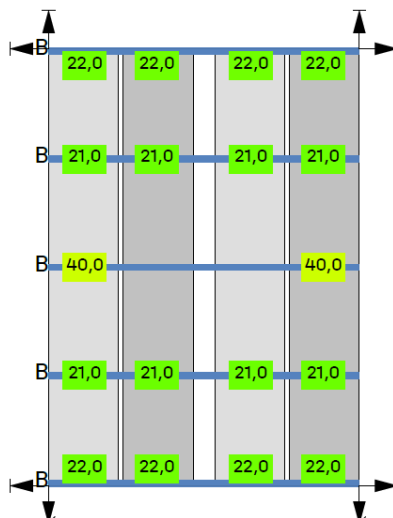
tab. 2.3 Celkový instalovaný výkon panelů výroby

2.3.1 Výpočet dodatečných zátěží nosných konstrukcí

Nosné konstrukce panelů jsou proti pohybu zajištěny zátěží, která je instalována buď přímo na základové lišty, nebo mezi ně. Hmotnost zátěže je určena povětrnostními vlivy v místě instalace. Obecně platí, že větší bloky s více panely vyžadují menší zátěž. Při

instalaci bloku o malém počtu panelů je vyžadovaná zátěž velká. Dalším způsobem zajištění nosných konstrukcí je mechanické kotvení do střešní konstrukce. Kotevní prvek však v tomto případě prochází hydroizolací střechy a prostupy je nutné utěsnit. Výhodou tohoto způsobu je možnost snížení hmotnosti dodatečné zátěže.

Na obr. 2.13 je snímek obrazovky z výpočtu vytvořeného v programu K2 BASE. Čísla v rámečcích značí navrhovanou zátěž v kg. Modré úsečky jsou instalační lišty. Zajištění nosných konstrukcí je provedeno pouze dodatečnou zátěží bez kotvení do nosných konstrukcí střechy.



obr. 2.13 Blok složený z 16 panelů

V elektronické příloze jsou výpočty zatížení pro všechny předmětné výroby provedené v programu K2 BASE. Výpočty slouží ke stanovení orientačního zatížení střech. Výpočtový program K2 BASE má svá omezení a přesné namodelování nosných konstrukcí dle výkresové dokumentace v něm nebylo možné. Přesné stanovení hmotností zátěží spolu s kontrolou nosností střech a jejich dovoleného zatížení je předmětem případného vyššího stupně projektové dokumentace. Výpočet vlivu instalovaných zařízení na statiku budov je nad rámec této práce a je mimo její zaměření.

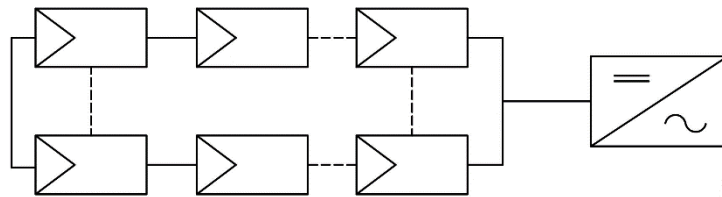
2.4 DC strana

O části výroby od panelů po střídač hovoříme jako o DC straně. Jejími prvky jsou fotovoltaické panely, regulátory, optimizéry a střídače. Dále je třeba věnovat pozornost také návrhu kabeláže a ochran. Fotovoltaické panely a jejich rozmístění bylo řešeno v předchozí kapitole. Tato kapitola se bude věnovat rozboru a návrhu ostatních částí DC strany.

2.4.1 Topologie DC strany

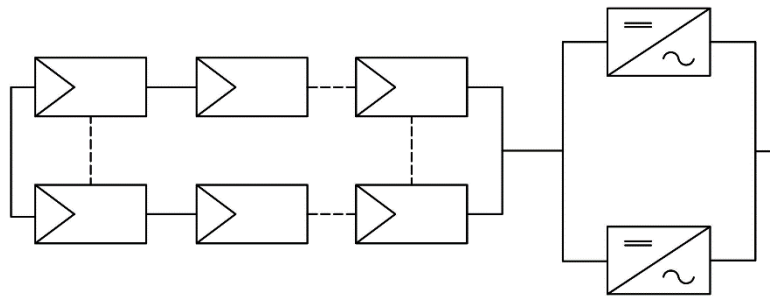
Dimenzování jednotlivých prvků se odvíjí od použité topologie. Použitá topologie souvisí s volbou střídače a jeho parametry. Volbou vhodné topologie lze dle potřeb vyvážit spolehlivost, velikost ztrát vlivem nesouladu osvitů, výpadku a konverze a finanční náročnost.

Centrální topologie je používána u velkých elektráren. Výhoda tohoto systému je jeho nižší cena v porovnání s ostatními topologiemi. Nevýhodou jsou ztráty částečným zastíněním, kvůli sledování bodu maximálního výkonu všech panelů jedním regulátorem/střídačem. Tento systém také nespĺňuje N-1 kritérium. Při poruše střídače je výroba vyřazena z provozu.



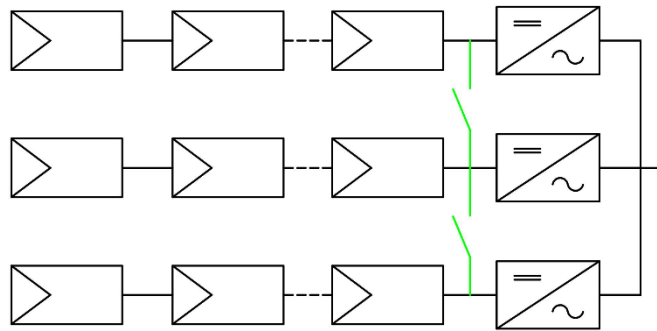
obr. 2.14 Centrální topologie

Částečným řešením problému centrální topologie je topologie typu master-slave. V tomto uspořádání pracují střídače paralelně s dostatečnou výkonovou rezervou pro splnění N-1 kritéria. V případě nízkého osvitů může být snížen počet pracujících střídačů a ty mohou být provozovány v oblasti svého optimálního zatížení. Ztráty částečným zastíněním jsou však stejným problémem jako v předchozím případě [8].



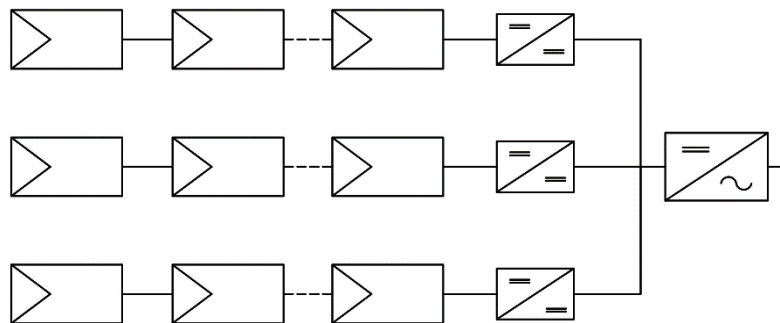
obr. 2.15 Topologie master-slave

String topologie je z pohledu řešení problému s částečným zastíněním vhodnější volbou. Jednotlivé panely jsou spojeny do stringů a každý string má svůj střídač. Její další výhodou je snadná rozšiřitelnost systému. Přidáním příčných spínačů (na obr. 2.15 zeleně) je možné při nízkém osvitů sloučit stringy do jednoho střídače.



obr. 2.16 String topologie s příčnými spínači

Další variantou je multistring topologie. Každý string má svůj regulátor, který je připojen na DC sběrnici. DC sběrnice je pak připojena ke střídači. Spolehlivost systému je však oproti string topologii vazbou horší, kvůli centrálnímu střídači. Toto uspořádání lze také provést s tzv. výkonovými optimizéry. Princip jejich funkce je stejný jako v případě regulátorů, ale používají se modulárně. Obvykle je jeden výkonový optimizér na jeden až dva panely.



obr. 2.17 Multistring topologie

Topologie lze vzájemně kombinovat dle místních podmínek a potřeb. Při dimenzování stringů je důležitým parametrem rozsah vstupního napětí zařízení, ke kterému jsou jednotlivé stringy připojeny. V případě centrální topologie je to rozsah vstupního napětí centrálního střídače, v případě multistring topologie je to rozsah regulátorů apod. Jednotlivé panely jsou ve stringu zapojeny paralelně, sériově nebo sérioparalelně tak, aby proud stringu nakrátko a napětí naprázdno byl v rozsahu přijatelném pro střídač či regulátor.

2.4.2 Výběr střídačů

Základním parametrem při výběru vhodných střídačů je nominální výkon. Střídače se vyrábí ve velkém rozsahu výkonů. Od modulárních s výkonem okolo 0,5 kW až po velké průmyslové střídače s výkonem v řádech MW. Podíl instalovaného výkonu panelů k nominálnímu výkonu střídače se nazývá koeficient dimenzování. Obecně je vhodné volit rozsah koeficientu mezi 1 až 1,2. V případě uspořádání panelů s nízkým sklonem (v našem případě 10°) je vhodné volit koeficient dimenzování roven 1, aby nedocházelo ke ztrátám výnosu.

Počet MPP trackerů je dalším důležitým parametrem při volbě střídače. Ve většině případů vede zvýšení počtu MPP trackerů v systému ke snížení ztrát částečným zastíněním. Na předmětných objektech budou panely instalovány ve východo-západním uspořádání. Na jeden MPP tracker lze připojit pouze panely se stejnou orientací, jinak by docházelo k výkonovému nesouladu. Proto je při konfiguraci stringů dobré mít dispozici větší počet MPP trackerů.

Dalšími důležitými parametry jsou účinnost, kompatibilita s ostatními prvky FVE, ochrany a EMC.

Pro navrhovanou výrobní byly zvoleny střídače Fronius SYMO. Jejich výhodou je, že jsou nabízeny ve velkém rozsahu výkonů 3 až 20 kW. Všechny parametry výkonové řady 12,5 až 20 kW jsou v 0. Vybrané důležité parametry jsou uvedeny v tab. 2.4 na následující straně.

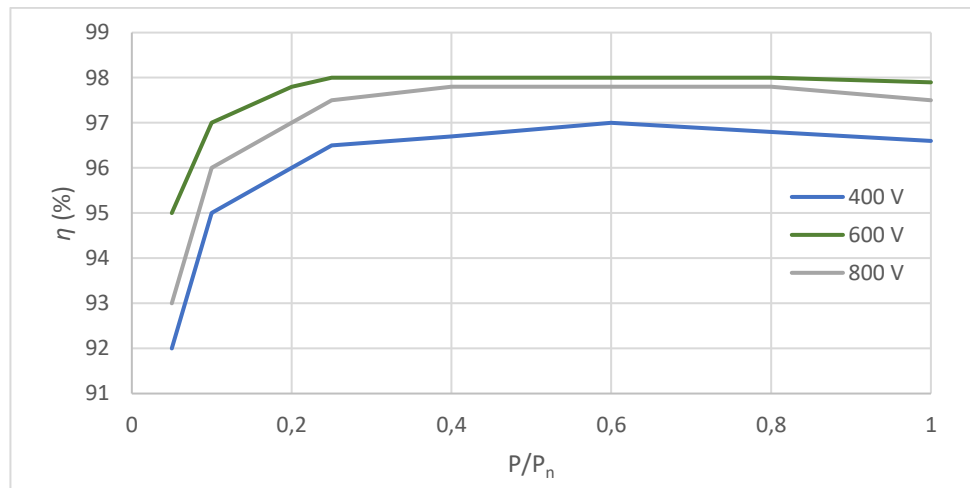
Parametr	SYMO 12.5-3-M	SYMO 15.0-3-M	SYMO 17.5-3-M	SYMO 20.0-3-M
Počet MPPT	2			
Max. vstupní proud I_{DCmax1}/I_{DCmax}	27,0 A / 16,5 A		33,0 A / 27,0 A	
Max. vstupní proud I_{DCmax}	43,5 A		51 A	
Max. zkratový proud pole panelů MPPT1/MPPT2	56 A / 34 A		68 A / 56 A	
Rozsah vstupního DC napětí	200-1000 V			
Spouštěcí napětí dodávky do sítě	200 V			
Rozsah napětí MPPT	200-800 V			
Počet přípojek DC	3+3			
Max. výkon FV generátoru	18,8 kW	22,5 kW	26,3 kW	30,0 kW
Jmenovitý výkon AC	12,5 kW	15,0 kW	17,5 kW	20,0 kW
Výstupní proud AC	18,0 A	21,7 A	25,3 A	28,9 A
Síťové připojení	3NPE 230/400 V (+20 % / - 30 %)			
Frekvence	50 Hz (45-65 Hz)			
THD	2,0 %	1,5 %	1,5 %	1,3 %
Účinník	0 až 1 ind. / kap.			
Rozměry	725 x 510 x 225 mm			
Hmotnost	34,8 kg		43,4 kg	
Krytí	IP 66			
Koncepce střídače	Beztransformátorový			
Chlazení	Řízené chlazení vzduchem			
Montáž	vnitřní i venkovní			
Rozsah okolní teploty	-40 až +60 °C			
Přípustná relativní vlhkost vzduchu	0 až 100 %			
Max. účinnost	98 %			
Evropská účinnost	97,6 %	97,8 %	97,8 %	97,9 %
Účinnost přizpůsobení MPP	> 99,9 %			
Chování při přetížení	Posunutí pracovního bodu, omezení výkonu			
Ochrana proti přepólování	ano			
Rozhraní				
WLAN / Ethernet LAN	Fronius Solar.Web, Modbus TCP SunSpec, Fronius Solar API			
6 vstupů a 4 digitální výstupy/vstupy	Připojení k přijímači HDO			
USB	datalogging			
RS485	Modbus RTU SunSpec			
2x RS422 (zásuvka RJ45)	Fronius Solar Net			

tab. 2.4 Parametry střídačů Fronius SYMO 12,5 až 20 kW [14]

2.4.3 Dimenzování stringů

Panely ve FV poli jsou skládány do tzv. stringů. Počet panelů Tyto stringy pak mohou být dále paralelně řazeny. Z hlediska napětí je nutné volit množství a zapojení panelů ve stringu a stringů tak, aby byl dodržen rozsah MPPT a maximální napětí naprázdno střídače $U_{DC MAX}$. Na obr. 2.18 je znázorněno, že nevhodná velikost napětí na vstupu střídače vede ke snížení jeho účinnosti. Ke snížení účinnosti nutně dochází také při snížení výkonu panelů. K omezení tohoto vlivu lze použít příčné spínače zmíněné v rámci string topologie v kapitole 0, toto řešení však nemusí být zrovna ekonomicky výhodné.

Každý MPPT má určitý rozsah vstupního proudu, ve kterém je schopen pracovat. Při jeho překročení dojde k ořezání výkonové špičky. Je však nutné nepřekročit maximální proud nakrátko MPPT, protože by mohlo dojít k poškození zařízení.



obr. 2.18 Účinnost střídače Fronius SYMO 20.0-3-M v závislosti na DC napětí a výstupním výkonu 0

Bylo zmíněno, že výkonová řada 10-20 kW střídačů Fronius SYMO, které byly vybrány pro návrh má rozsah vstupního napětí MPPT 200-800 V. Na obr. 2.18 je vidět, že ideální účinnosti dosahuje při napětí na DC straně $U_{DC} = 600$ V. Napětí zvolených panelů naprázdno je při NOCT $U_{OC NOCT} = 35,3$ V. Tzn. že ideální počet panelů v sérii z hlediska vstupního napětí MPPT je

$$n_U = \frac{U_{DC}}{U_{OC NOCT}} = \frac{600}{35,3} = 17 \text{ ks.} \quad (2.3)$$

Pro zjištění maximálního počtu panelů zapojených sériově ve stringu je nutné vypočítat maximální napětí nezátíženého stringu $U_{OC MAX}$. V případě neznámé minimální teploty okolí se tato hodnota dle [18] stanoví jako $1,2 \cdot U_{OC STC}$. Napětí panelu naprázdno je při STC $U_{OC STC} = 37,5$ V. Při maximálním vstupním napětí střídače $U_{DC MAX} = 1000$ V je tedy maximální počet sériově zapojených panelů ve stringu

$$n_{U,MAX} = \frac{U_{DC MAX}}{U_{OC MAX}} = \frac{U_{DC MAX}}{1,2 \cdot U_{OC STC}} = \frac{1000}{1,2 \cdot 37,5} = 22 \text{ ks.} \quad (2.4)$$

Dále je při dimenzování stringů nutné dodržet maximální proud nakrátko MPPT I_{MAX} . Maximální zkratový proud panelu se dle [18] stanoví jako $I_{SC MAX} = 1,25 \cdot I_{STC}$. Jsou-li panely ve stringu řazeny sériově, tak je maximální počet stringů paralelně připojených k MPPT dán vztahem

$$n_I = \frac{I_{MAX}}{I_{SC MAX}} = \frac{I_{MAX}}{1,25 \cdot I_{STC}}. \quad (2.5)$$

Příklad dimenzování stringů pro střídač Fronius SYMO 20 kW použitý v případě objektu T8+T10 (výrobna č.1) je v tab. 2.5. Hodnoty v tabulce byly vypočteny pomocí programu Fronius Solar.creator.

Typ střídače	Fronius SYMO 20.0-3-M
Typ panelu	Longi Solar LR5-54HBH-415M
Koeficient dimenzování	102 %
P při 25 °C	20,34 kW _p
Rozdělení panelů na MPPT (MPPT1/MPPT2)	2x17 ks / 1x15 ks
I_{sc} při 25 °C (MPPT1/MPPT2)	27,88 A / 13,94 A
U_{DC} při 70 °C (MPPT1/MPPT2)	459 V / 405 V
U_{DC} při -10 °C (MPPT1/MPPT2)	697 V / 615 V

tab. 2.5 Příklad konfigurace střídače Fronius SYMO 20 kW

V tab. 2.6 je přehled dimenzování stringů všech panelů dle dílčích výroben.

		MMPT1		MMPT2	
		počet paralelních stringů	počet panelů ve stringu	počet paralelních stringů	počet panelů ve stringu
T8+ T10 výr. č.1	INV1 SYMO 20 kW	2	15	1	17
	INV2 SYMO 20 kW	2	17	1	15
	INV3 SYMO 20 kW	2	16	1	17
	INV4 SYMO 20 kW	2	17	1	15
	INV5 SYMO 20 kW	2	17	1	15
T10- 4.np výr. č.2	INV1 SYMO 20 kW	2	18	1	12
T12 výr. č.3	INV1 SYMO 12,5 kW	1	17	1	16
	INV2 SYMO 15 kW	1	18	1	17
	INV3 SYMO 20 kW	2	16	1	16
	INV4 SYMO 17,5 kW	2	15	1	12
	INV5 SYMO 17,5 kW	2	12	1	17

tab. 2.6 Přehled dimenzování stringů dílčích výroben

2.4.4 DC kabeláž a kabelové trasy

Ve fotovoltaických instalacích se pro vedení na DC straně používají jednožilové kabely s dvojitou izolací. Požadavky na kabely pro fotovoltaické systémy jsou popsány v normě ČSN EN 50618. Tyto kabely se zpravidla nachází ve venkovních prostorech a musí tak odolávat UV záření, povětrnostním vlivům a rozsahu teplot $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $90\text{ }^{\circ}\text{C}$. Předpokládaná životnost je 25 let. Jmenovité napětí pro kabely na DC straně fotovoltaických systémů je 1,5 kV. Jádra vodičů musí být měděná s pocínovanými dráty. Kabely pro FV instalace jsou značeny kódem H1Z2Z2-K [9]. Proudová zatížitelnost je v tab. 2.7. Při dimenzování se uvažuje přepočítávací koeficient proudové zatížitelnosti je $k_1 = 1$ až do teploty okolí $60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dle ČSN 33 2000-7-712 je však minimální návrhová teplota pod panely $70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Přepočítávací koeficient je pak 0,92.

jmenovitý průřez jádra [mm ²]	Proudová zatížitelnost dle způsobu instalace [A]		
	Samostatný kabel volně ve vzduchu	Samostatný kabel na povrchu	Dva zatížené dotýkající se kabely, na povrchu
2,5	41	39	33
4	55	52	44
6	70	67	57
10	98	93	79

tab. 2.7 Proudová zatížitelnost fotovoltaických kabelů [9]

Při dimenzování kabeláže stringu se fiktivní hodnota proudu pro volbu průřezu vypočítá dle

$$I_n = \frac{I_k \cdot N \cdot k_b}{k_1} \quad (2.6)$$

, kde I_k je proud panelu nakrátko při STC

N je počet paralelních stringů

k_b je bezpečnostní koeficient (cca 1,2 až 1,3)

k_1 je koeficient proudové zatížitelnosti pro rozdílné teploty okolí dle [9].

Nachází-li se kabeláž ve svazku, je při výpočtu fiktivního proudu nutné uplatnit další pře počítávací koeficient dle tab. B.52.17 v [10]. Mimo proudovou zatížitelnost kabelů je také třeba sledovat maximální možné zatížení spojovacích konektorů MC4.

Je vidět, že proudová zatížitelnost je vysoká. FV kabely však není vhodné dimenzovat pouze s ohledem na proudovou zatížitelnost z důvodu výkonových ztrát. Ztráty na DC vedení by neměly překročit 2 %. V praxi jsou k dostání FV kabely o průřezu 2,5 mm² a výš.

Pro uložení kabelů do tras jsou používány kabelové žlaby. Nejpoužívanější jsou žlaby drátěné a oceloplechové. V případě potřeby vysoké nosnosti jsou používány kabelové žebříky. Pro nekryté venkovní použití je vhodná povrchová úprava žlabů žárový zinek. Ideální jsou však žlaby nerezové. Při určování velikosti žlabu je nutné, aby součet průřezů kabelů byl menší nebo roven 70 % jmenovitého průřezu žlabu [19] [20].

2.4.5 DC Rozváděče

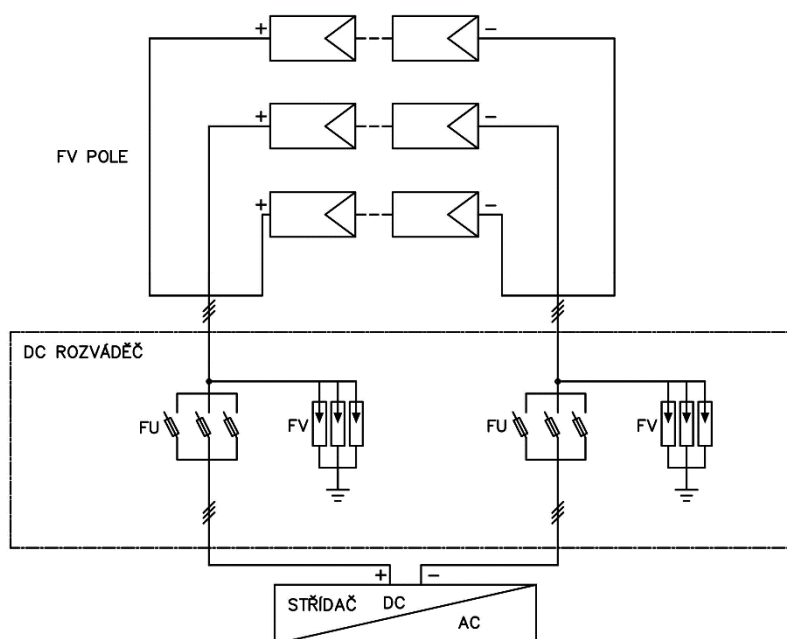
DC rozváděče slouží k jistění a ochraně DC vedení. Umisťují se mezi fotovoltaické pole a střídač.

DC rozváděče navržené pro předmětnou výrobu obsahují jistění proti nadproudu provedené pojistkovými odpojovači s válcovými pojistkovými vložkami 16 A gPV. Jejich výhodou je nízká cena. Nevýhodou je, že s nimi není možné manipulovat pod zatížením. Napětí na DC straně může dosahovat 1000 V a v případě manipulace s odpojovači pod zatížením by mohlo dojít k vytažení elektrického oblouku. V případě

nutnosti manipulace pod zatížením je nutné použít DC odpínače. Dále jsou DC rozváděče vybaveny přepět'ovou ochranou typu 1+2, viz kapitola 2.4.6.

V navrhovaných výrobnách budou DC rozváděče umístěny na střeších. Tomu musí odpovídat i jejich krytí a odolnost proti vnějším vlivům.

Příklad provedení DC rozváděče s pojistkovými odpojovači a přepět'ovou ochranou je na obr. 2.19.



obr. 2.19 DC rozváděč s použitím pojistkových odpojovačů

2.4.6 Ochrana před přepětím

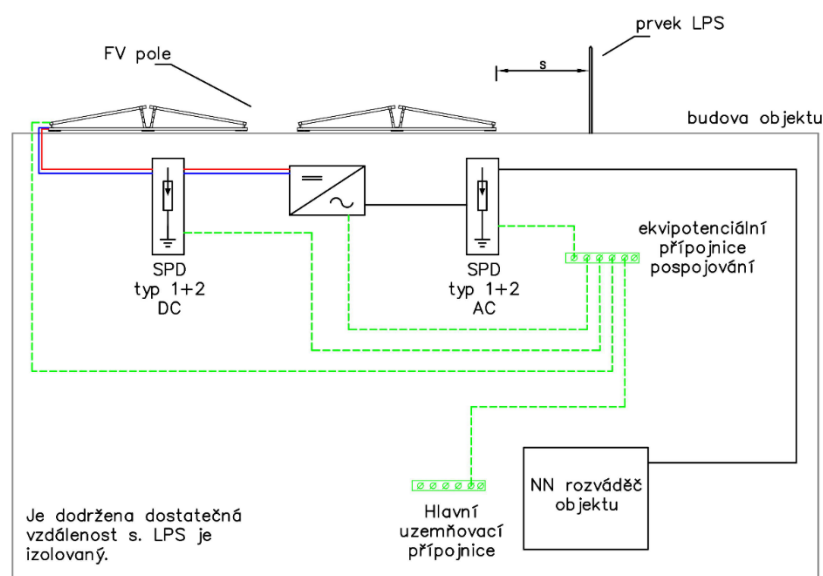
Ve fotovoltaické instalaci mohou přepětí nastat z několika důvodů:

- Přímý úder blesku do vnějšího systému ochrany před bleskem, poblíž budovy nebo přímo do FV instalace
- Proudů indukovaných bleskem do rozvodů elektrické sítě
- Přenosem z rozvodné sítě
- Rozdíly v elektrickém poli následkem blesku [12]

Přepět'ové ochrany typu 1 pro FV se instalují co nejbližší vstupu napájecích systémů ze střechy do budovy a zajišťují tak jejich nepřímé připojení k zemnicí soustavě v rámci bleskového vyrovnání potenciálů. Na trhu jsou k dispozici kombinované svodiče typu 1+2, které plní funkci svodičů bleskových proudů spolu s přepět'ovou ochranou. Pokud střídač není vybaven integrovanou přepět'ovou ochranou typu 2 pro FV instalace, musí mu být předřazena. Na AC straně střídače je dále umístěna přepět'ová ochrana typu 1. Uzemnění všech jmenovaných přepět'ových ochrany a střídače je realizováno přes ekvipotenciální přípojnicí pospojování viz obr. 2.20. Při dimenzování přepět'ových

ochran je nutné zvolit jejich nominální napětí z údajů napětí stringu naprázdno v zimním období s jistou rezervou.

Při navrhování uspořádání nosných konstrukcí panelů je nutné brát na vědomí, že FV instalace nesmí zasahovat do vnějšího systému ochrany budovy před bleskem a musí být před přímými údery blesku chráněna. Nosné konstrukce s panely a kabely tedy musí být instalovány v prostoru chráněném jímacím systémem. Splnění této podmínky se ověřuje dle normy EN 62305-3. Zároveň musí být dodržena dostatečná vzdálenost s , viz kapitola 2.2.1, není-li tuto vzdálenost možné dodržet, propojují se nosné konstrukce panelů přímo se systémem ochrany před bleskem. Důsledná koordinace se systémem ochrany před bleskem dané budovy a vlastní opatření pro omezení škodlivých účinků atmosférického přepětí je stěžejní jak z důvodu ochrany osob, tak instalovaných zařízení.



obr. 2.20 Umístění přepět'ových ochran v budově se systémem ochrany před bleskem

2.4.7 Doplnující ochranné pospojování

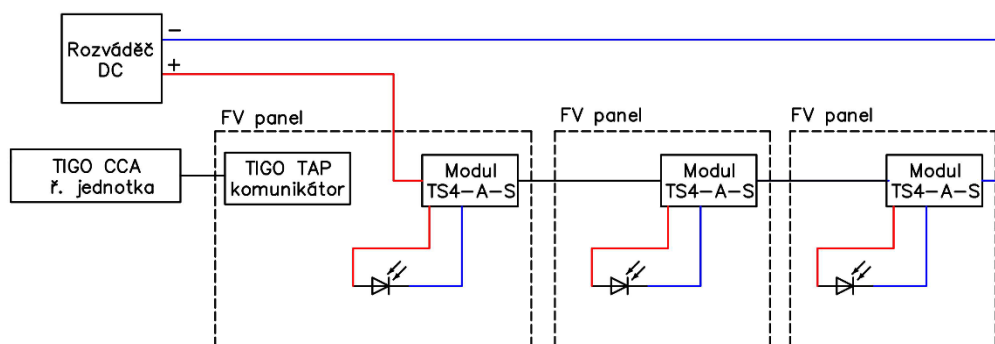
Doplňující ochranné pospojování zajišťuje ochranu před úrazem elektrickým proudem. Všechny kovové konstrukce musí být připojeny k uzemňovací soustavě [11]. Jedná se o nosné konstrukce panelů, kryty rozváděčů, kabelové žlaby a kanály ale i cizí neživé části. To je provedeno jak připojením k ekvipotenciální přípojnici pospojování, tak k hlavní uzemňovací přípojnici doplňujícím uzemňovacím spojením. Dle ČSN EN 2000-5-54 ed.3 je pro měděný vodič minimální průřez 6 mm^2 .

2.4.8 Systém vypnutí na úrovni panelu

Fotovoltaické panely z principu své funkce generují stejnosměrné napětí i při odpojení od zbytku FV systému. Napětí, které se může na DC straně objevit, je v případě této výroby v rozmezí až 700-800 V. V případě nutnosti požárního zásahu vzniká pro hasiče

riziko úrazu elektrickým proudem. Řešením tohoto problému je zajištění odpojení na úrovni panelu. To lze provést instalací modulárních vypínačů/optimizérů. V případě odpojení na úrovni panelu je nejvyšší napětí, které se může ve výrobně objevit dáno právě nejvyšším možným napětím jednoho panelu.

V navrhované výrobně budou z výše zmíněných důvodů instalovány modulární vypínače kombinované s monitorovacím zařízením TIGO TS4-A-S. Moduly jsou řízeny bezdrátově. Systém sestává z řídicí jednotky TIGO CCA, která je připojena ke komunikátoru TIGO TAP. Tento komunikátor je bezdrátově spojen s jednotlivými moduly na úrovni panelu. V případě ztráty komunikace mezi řídicí jednotkou a moduly dojde k bezprostřednímu vypnutí. Schéma zapojení systému vypnutí na úrovni panelu je na obr. 2.21.



obr. 2.21 Schéma systému vypnutí na úrovni panelu

2.5 AC strana

O části FV systému za fázovacím místem hovoříme jako o AC straně. Součástí strany AC mohou být rozváděče AC, ochrany, transformátory a vedení v závislosti na způsobu vyvedení výkonu výroby.

2.5.1 Ochrany AC

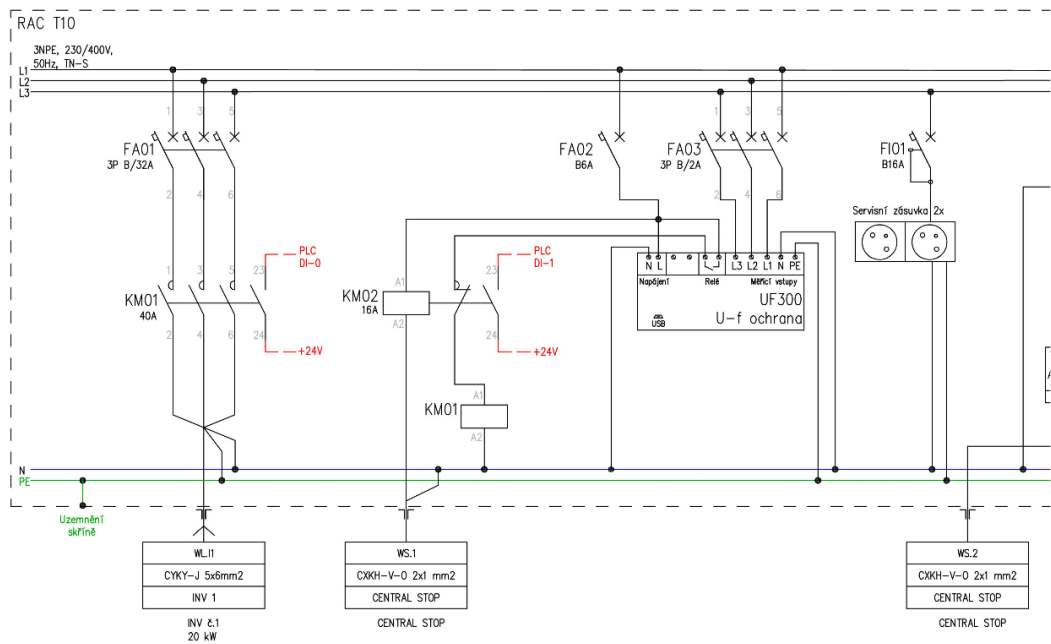
Ochrany instalované na AC straně se dělí na napěťové, frekvenční, nadproudové a přepět'ové. Napěťovou a frekvenční ochranu je možné zajistit přístrojem sledujícím napětí a frekvenci sítě. Přístroje dostupné na trhu dovolují i víceúrovňové nastavení, díky čemuž je možné vyhovět podmínkám uvedeným v kapitole 1.2.4. Nadproudové ochrany jsou na hladině NN realizovány jističi a pojistkami. Přepět'ové ochrany na AC straně chrání proti šíření přepětí z napájecí sítě. Jejich provedení závisí na uspořádání místa, do kterého je vyveden AC rozváděč FV systému.

2.5.2 Rozváděče AC

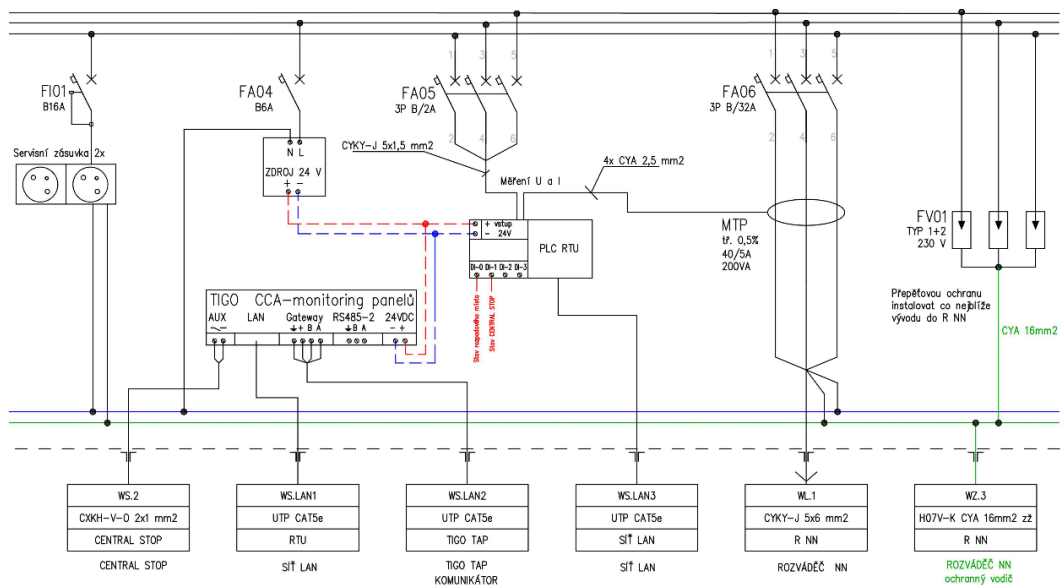
Na obr. 2.22 a obr. 2.23 je liniové schéma rozváděče RAC, který je použit v objektu T10-4.np (výrobna č.2). Rozváděč obsahuje přípojnice L1, L2, L3, N a PE. Napěťová soustava je 3NPE, 230/400 V, 50 Hz, TN-S pro silovou část a 2DC IT, 24 V pro ovládací část. Ochranný vodič je přiveden z rozváděče NN umístěného uvnitř budovy vodičem CYA 16 mm². Přívod ze střídače je chráněn jističem FA01. Před jištěním je osazen stykač KM01, který je rozpadovým místem. Stykač je vybaven pomocným kontaktem pro signalizaci stavu, který spíná ovládací napětí 24 V na digitální vstup PLC DI-0. Rozváděč je vybaven síťovou ochranou UF300, která sleduje frekvenci a napětí. Ochrana je nastavena dle tab. 1.3 v podkapitole o nastavení ochrany. Zapůsobení ochrany způsobí rozepnutí relé, přes které je napájena cívka stykače KM01 a dojde k vypnutí přívodu ze střídače. V rozváděči je jednotka pro monitoring panelů TIGO CCA. Ta je pomocí sériové linky kabelem UTP CAT5e připojena ke komunikátoru TIGO TAP umístěnému ve FV poli. Jednotka pro monitoring TIGO CCA je přes ethernet připojena do sítě LAN. Dalším zařízením v rozváděči je PLC RTU jednotka zajišťující měření napětí a proudu na vývodu do rozváděče NN a komunikaci mezi výrobny. Měření je provedeno polopřímo za použití měřicího proudového transformátoru 40/5 A. Jednotka PLC RTU je připojena do sítě LAN. TIGO CCA a PLC RTU jednotky jsou napájeny ze zdroje 24 V, který zároveň slouží jako zdroj stejnosměrného ovládacího napětí. Vývod do rozváděče NN je vybaven jističem 3P B/32 A. V koordinaci s provedením přívodu do rozváděče NN je možné umístit jištění pouze v něm a rozváděč RAC vybavit místo jističe vypínačem. Co nejbližší vývodu do rozváděče NN je osazena přepětíová ochrana typu 1+2. V rozváděči jsou také umístěny dvě servisní zásuvky.

Rozváděč RAC je vybaven tlačítkem CENTRALSTOP. Stisknutím tlačítka dojde k rozpadu stykače KM01 a jednotka pro monitoring panelů TIGO CCA dostane povel k odpojení na úrovni panelu. DC kabely, střídače i rozváděč DC tak budou bez napětí. Pomocný kontakt stykače KM02 signalizuje stav tlačítka CENTRALSTOP do PLC RTU.

Výrobny nemohou pracovat v ostrovním provozu. Odpojením od sítě dojde opět k rozpadu KM01 a odpojení na úrovni panelu.



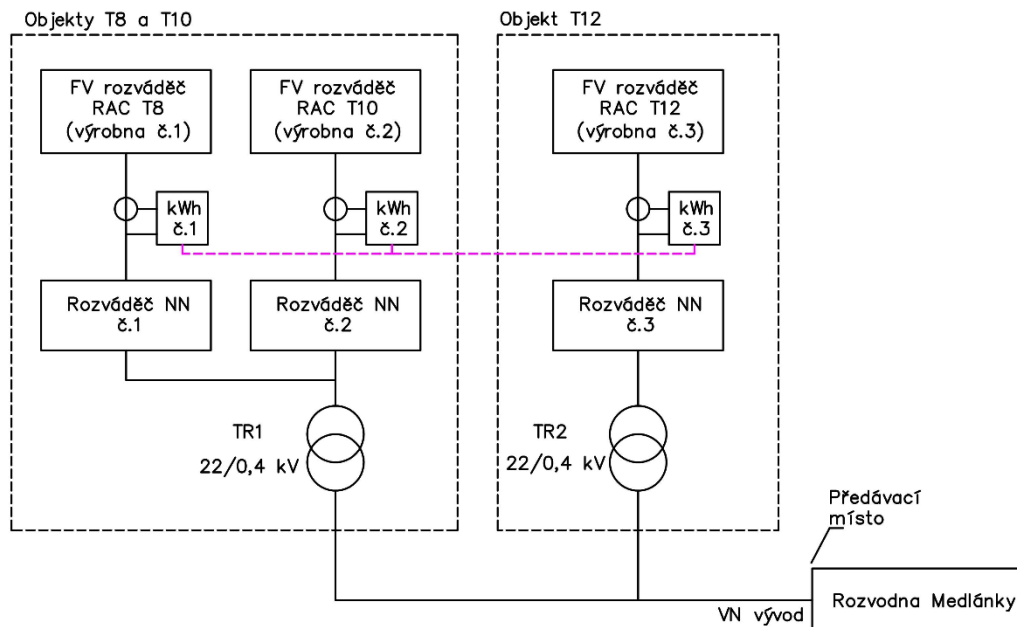
obr. 2.22 Liniové schéma RAC část 1



obr. 2.23 Liniové schéma RAC část 2

2.5.3 Vyvedení výkonu

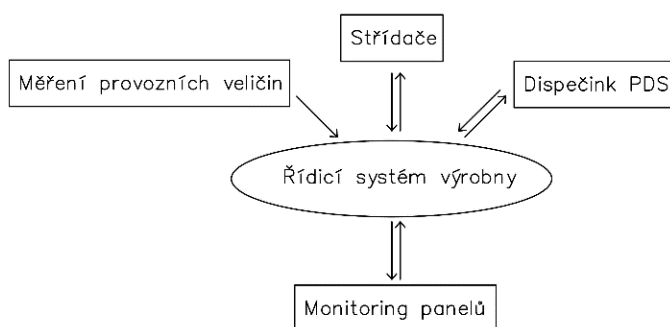
Výrobna v této práci je provedena jako tzv. vnořená. Skládá se ze tří výroben ve třech různých objektech se společným odběrným místem na straně VN, viz obr. 2.24. Vyvedení výkonu bude provedeno připojením výstupu AC rozváděčů FV systémů v jednotlivých objektech do rozváděčů NN, takže budou využity stávající transformátory.



obr. 2.24 Blokové schéma vyvedení výkonu vnořené výroby

2.6 Řízení výroby a datová komunikace

V kapitole 1 byly řešeny podmínky chování výroben v síti a požadavky na dálkové řízení a výměnu dat. Výrobna tedy musí obsahovat nejen řízené prvky a senzory sledovaných veličin, ale také systém pro jejich vyhodnocování, odesílání a přijímání, který je schopen jednotlivé akční členy povelovat, viz blokový diagram na obr. 2.25. Při návrhu tohoto systému je nutné znát komunikační rozhraní použita v jednotlivých zařízeních a na jejich základě zvolit vhodnou topologii a komunikační protokol. Komunikační protokol pro výměnu dat s dispečinkem je zvolen na základě dohody s PDS [2].

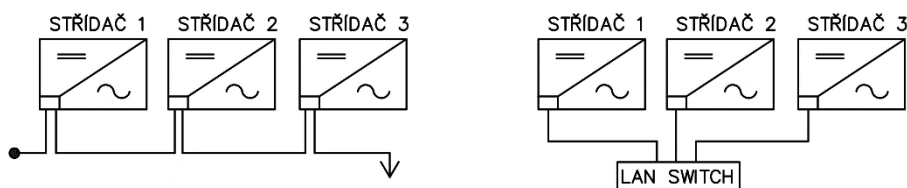


obr. 2.25 Blokový diagram řízení výroby

Nejčastěji používaný komunikační protokol je Modbus. Modbus využívá architekturu master-slave a přenosovým médiem může být buď sériová linka s protokolem Modbus RTU nebo ethernet s protokolem Modbus TCP.

2.6.1 Komunikace se střídači

Použití komunikační topologie znázorněné na obr. 2.25 bude znamenat, že střídač, případně skupina střídačů v daném objektu bude mít přidělenou IP adresu. RTU jednotka pak bude naprogramována tak, aby povely z dispečinku přenášela na střídače v jednotlivých objektech. V jednotlivých objektech bude dle zvolené topologie použit buď jeden střídač, nebo skupina střídačů. V případě skupiny střídačů je nutné jejich vzájemné datové propojení. To může být provedeno buď sériovou linkou, nebo paprskově v závislosti na tom, kterou technologii daný střídač umožňuje. Komunikační technologie různých výrobců střídačů jsou odlišné. Na obr. 2.26 jsou uvedeny dva způsoby datového propojení střídačů.

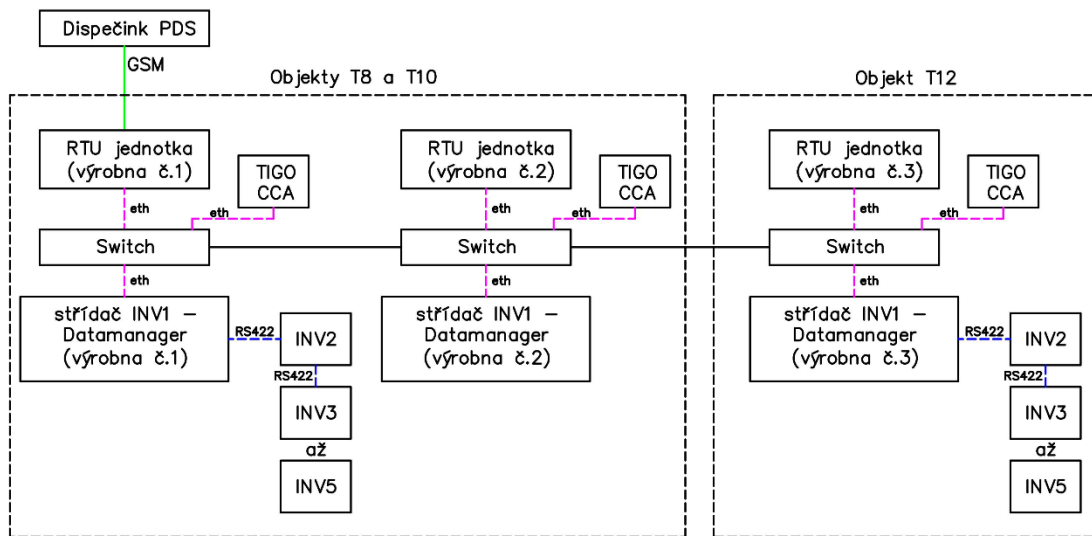


obr. 2.26 Propojení střídačů přes sériovou linku (vlevo) a paprskově (vpravo)

Střídače SYMO použité v návrhu jsou propojeny přes sériovou linku v režimu master/slave kabelem UTP CAT 5e. Master střídač je osazen jednotkou Datamanager.

2.6.2 Provedení datové komunikace

Na obr. 2.27 je blokové schéma provedení datové komunikace navrhované vnořené výrobní. Dispečink PDS komunikuje s RTU jednotkou výrobní č.1 přes GSM. Tato jednotka je připojena přes switch do sítě LAN. RTU jednotky výroben č. 2 a 3 jsou opět připojeny do sítě LAN. Střídače jsou vždy v rámci výrobní propojeny přes sériovou linku v režimu master/slave. Master střídač je vybaven jednotkou Datamanager. Každá výrobní má svou jednotku pro monitoring a spínání optimizérů TIGO CCA. Tyto jednotky jsou také připojeny do sítě LAN. Datový výstup posledního střídače v sériové lince musí být vybaven ukončovacím rezistorem.



obr. 2.27 Blokové schéma datové komunikace

3. EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ PROJEKTU

Technické řešení vnořené výroby bylo řešeno v předchozích kapitolách. Tato kapitola se bude věnovat ekonomickému zhodnocení projektu jako celku. Na základě položkového rozpočtu a celkové ceny z něj vyplývající bude vypočtena prostá doba návratnosti. Vzhledem k tomu, že výstavba obnovitelných zdrojů energie je v současné době podporovaná státem, tak budou prozkoumány i možnosti získání dotace.

3.1 Položkový rozpočet

Na základě výkazu výměr byl vytvořen položkový rozpočet. Jeho součástí jsou náklady na materiál elektro a kotevní systém, elektroinstalace (montáž) a ostatní. Ceny některých položek jsou převzaty z cenové soustavy RTS DATA společnosti RTS a.s. Ceny ostatních položek byly stanoveny dle aktuálních cen na trhu. Cenová soustava dané položky je v položkovém rozpočtu vždy uvedena. Dále je v položkovém rozpočtu u některých položek uveden její kód. V případě položek oceněných dle RTS je to identifikátor pro nalezení dané položky v RTS datech. V případě kotevního systému se jedná o objednávací kód výrobce K2. Položkový rozpočet je v elektronické příloze a je součástí projektové dokumentace. V tab. 3.1 je uvedena celková cena dle jednotlivých výroben.

Rozpis cen dle objektů		
objekt	cena bez DPH	cena s DPH 21 %
T8+T10 (výrobna č.1)	2 482 445 Kč	3 003 758 Kč
T10-4.np (výrobna č.2)	616 639 Kč	746 133 Kč
T12 (výrobna č.3)	2 148 004 Kč	2 599 084 Kč
Celková cena		
Celkem bez DPH	5 247 087 Kč	
DPH 21 %	1 101 888 Kč	
Celkem s DPH 21 %	6 348 975 Kč	

tab. 3.1 Rozpis cen dle objektů a celková cena

3.2 Ekonomická efektivita investice

Primární účel projektu je snížení nákladů na elektrickou energii spotřebovávanou v areálu FEKT. Jedná se tedy o úsporné opatření, u něhož nás zajímá prostá doba návratnosti PB .

Prostá doba návratnosti je statická metoda stanovení efektivity investice. Jejím výstupem je časový úsek, za který peněžní příjmy či úspory dosáhnou výše investičního výdaje. Vypočítá se dle vzorce

$$PB = \frac{K_i}{CF}, \quad (3.1)$$

kde PB je prostá doba návratnosti,

K_i je investiční výdaj

a CF je roční úspora nákladů.

Investiční výdaj bude uvažován jako celková cena bez DPH, viz kapitola 3.1.

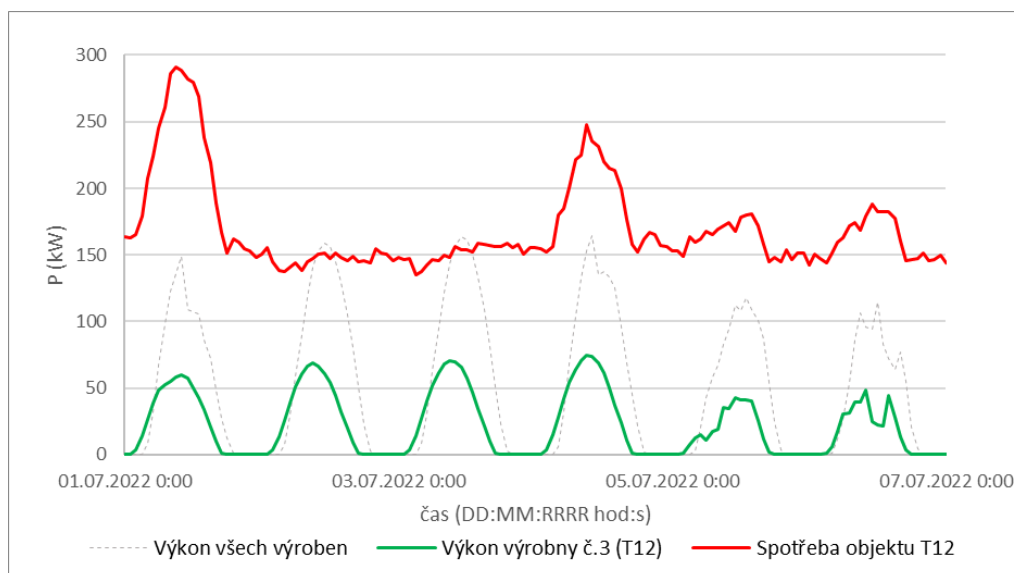
Roční úspora nákladů se vypočte z ročního energetického výnosu a ceny za elektrickou energii. Pro určení ročního energetického výnosu bude použita simulace výroby v programu PV*SOL. V tab. 3.2 jsou hodnoty dodané energie za rok dle jednotlivých výroben.

Objekt	Dodaná energie E_r (kWh/rok)
T8+T10 (výrobna č.1)	101 708
T10-4.np (výrobna č.2)	19 242
T12 (výrobna č.3)	84 788
Celkem	205 738

tab. 3.2 Roční dodaná energie dle jednotlivých výroben

U výrobny je uvažováno, že veškerá vyrobená energie bude spotřebována v areálu VUT a nepředpokládá se přetok do sítě. Pro ověření tohoto předpokladu jsou na obr. 3.1 uvedeny diagramy výroby a spotřeby činného výkonu objektu T12. Výrobní diagram byl získán na základě simulace předmětné výroby v programu PV*SOL. Diagram spotřeby byl sestaven na základě dat z fakturačního měření na VN odbočce pro objekt T12. Pro ostatní objekty nebyla data z fakturačních měření dostupná. Jako časový úsek byl použit první týden v červenci roku 2022. V tomto časovém období je energetický zisk z FV výroby v rámci hodnot v průběhu roku vysoký. Spotřeba objektu je v letních v měsících naopak nižší. Z diagramů je patrné, že základní zatížení objektu T12 je cca 2x vyšší, než výkon výroby č.3 ve špičce. V diagramu je také vykreslena suma výkonů všech dílčích výroben (výrobna č.1 až výrobna č.3). Z průběhu lze vidět, že i samotný objekt T12 by

svou spotřebou pokryl naprostou většinu výkonu všech 3 dílčích výroben. Na základě těchto dat lze konstatovat, že veškerý výkon bude spotřebován v místě výroby a k přetokům do sítě docházet nebude.



obr. 3.1 Srovnání diagramů výroby a spotřeby činného výkonu objektu T12

Díky tomu lze celkovou roční úsporu nákladů CF lze vypočítat dle rovnice

$$CF = E_r \cdot n_{EE} - N_{\dot{u}dr}, \quad (3.2)$$

kde E_r je roční dodaná (vyrobená) energie [kWh/rok],

n_{EE} je cena za elektrickou energii [Kč/kWh]

a $N_{\dot{u}dr}$ je roční náklad na údržbu [Kč/rok].

Cenu za elektrickou energii n_{EE} se od investora nepodařilo získat, protože se jedná o citlivý údaj. Bude proto pro účely výpočtu prosté doby návratnosti odhadnuta z dostupných údajů. Cena za elektrickou energii se skládá ze silové a regulované části. V případě silové části bude uvažována hodnota současného vládního stropu. Jeho hodnota je dle nařízení vlády č. 298/2022 Sb. 5000 Kč/MWh bez DPH. Položkové ceny regulované části jsou stanoveny v Energetickém regulačním věstníku vydávaném ERÚ. V našem případě se jedná o odběratele na hladině VN. Stanovení množství jednotlivých položek bylo provedeno na základě poskytnutých dat z měření elektrické energie objektu T12. Jedná se o roční přehled z roku 2022.

Platba za silovou elektřinu	množství	jednotka	CZK/jednotka	celkem CZK
Silová energie	1669,365	MWh	5000	8 346 825 Kč
Daň z elektřiny	1669,365	MWh	28,3	47 243 Kč
Regulované platby	množství	jednotka	CZK/jednotka	celkem CZK
Nevyžádaná dodávka jalové energie	724,790	Mvarh	440 Kč	318 908 Kč
Náklady za systémové služby ČEPS	1669,365	MWh	113,53 Kč	189 523 Kč
Náklady za překročení rez. kapacity	0	MW	861 000 Kč	0 Kč
Náklady za překročení rez. příkonu	0	MW	8 599 920 Kč	0 Kč
Náklady za použití sítí PDS	1669,365	MWh	90,51 Kč	151 094 Kč
Náklady na krytí vícenákladů OZ a KVET	1669,365	MWh	350 Kč	584 278 Kč
Náklady na činnost zúčtování OTE	1669,365	MWh	0,99 Kč	1 653 Kč
Roční cena za roční rezervovanou kapacitu DS	0,4	MW	1 946 328 Kč	778 531 Kč
Roční cena za měsíční rezervovanou kapacitu DS	0	MW	2 149 980 Kč	0 Kč
Nedodržené smluvní hodnoty účinníku $\text{tg}\varphi > 0,328$	0,475	-	-	1 148 425 Kč
Celková cena za silovou elektřinu				8 394 068 Kč
Celková cena regulované složky				3 172 411 Kč
Celkem				11 566 479 Kč
Celkem za MWh				6 929 Kč

tab. 3.3 Odhad roční ceny za elektrickou energii pro objekt T12

Roční náklady na údržbu $N_{údr}$ budou uvažovány jako 1 % z celkového investičního výdaje.

Prostá doba návratnosti je pak dle vzorců (3.1) a (3.2) pro celou výrobu

$$\begin{aligned}
 PB &= \frac{K_i}{CF} = \frac{K_i}{E_r \cdot n_{EE} - N_{údr}} = \frac{K_i}{E_r \cdot n_{EE} - K_i \cdot 0,01} \\
 &= \frac{5247087}{205,74 \cdot 6929 - 52471} = 3,7 \text{ roku.}
 \end{aligned}
 \tag{3.3}$$

V tab. 3.4 je přehled prosté doby návratnosti jednotlivých výroben.

	dodaná energie (MWh/rok)	platba za elektřinu bez DPH (Kč/MWh)	roční úspora nákladů (Kč)	investiční výdaj bez DPH (Kč)	Náklady na údržbu (Kč/rok)	PB (roky)
T8+T10	101,71	6929	704 836	2 482 445	24 824	3,5
T10-4.np	19,24		133 347	616 639	6 166	4,6
T12	84,79		587 581	2 148 004	21 480	3,7
celkem	205,74		1 425 764	5 247 087	52 471	3,7

tab. 3.4 Prostá doba návratnosti investice

3.3 Dotační podpora

V současné době je připravován dotační program s názvem Nové obnovitelné zdroje v energetice – RES+. Vyhlášení je plánováno na 3. kvartál roku 2023. Dotace spadá pod modernizační fond státního fondu životního prostředí, který čerpá prostředky z monetizace emisních povolenek [21]. Dotace je určena pro právnické i fyzické osoby, které jsou držiteli licence pro podnikání v energetických odvětvích. Podpora se vztahuje na elektrárny do výkonu 1 MW_p i nad něj. Při podání žádosti je nutné mít uzavřenou smlouvu o připojení do DS. Podpora je vyplácena ex post po dokončení projektu. Výše podpory je určena procentem ze způsobilých výdajů [23].

Mezi způsobilé výdaje patří např.:

- Přímé realizační výdaje (stavební práce, dodávky a služby)
- Činnosti odborného technického dozoru, autorského dozoru a BOZP
- Vícepráce (v maximální výši způsobilých méně prací)

Mezi nezpůsobilé výdaje patří např.:

- DPH
- Splátky úvěrů, úroky
- Vícepráce nad úroveň způsobilých méně prací
- Mzdové a ostatní výdaje na zaměstnance, režijní a provozní výdaje
- Vyvolané investice, které nejsou přímo spojeny s účelem projektu
- Výdaje na zpracování projektové dokumentace a projektovou činnost [22] [23]

Přesné znění výzvy ani výše podpory zatím nejsou známy. Dle [23] lze maximální možnou výši dotace vypočítat dle instalovaného výkonu. Částka však nesmí překročit 50 % z celkových nákladů projektu. Pro FVE na obálkách budov platí a instalovaný výkon dle návrhu platí

$$\text{Max. výše podpory} = P_{inst} \cdot 13000 = 202,5 \cdot 13000 = 2\,632\,500 \text{ Kč.} \quad (3.4)$$

To je více, než 50 % z celkových nákladů bez DPH, a proto je maximální výše podpory zastropována částkou

$$\begin{aligned} \text{cenový strop podpory} &= 0,5 \cdot K_i = 0,5 \cdot 5\,048\,779 \text{ Kč} = \\ &= 2\,524\,389 \text{ Kč.} \end{aligned} \quad (3.5)$$

Na tuto částku je nutno pohlížet jako na maximální možnou v rámci dotačního programu. Výše podpory jsou v jednotlivých výzvách upravovány na základě vývoje trhu.

Finanční podpora by měla pozitivní vliv na ekonomickou efektivitu investice, a proto by před případnou realizací projektu bylo vhodné prozkoumat aktuální dotační možnosti.

3.4 Celkový přehled

V tab. 3.5 je uveden celkový přehled výroby. Data uvedená v tabulce jsou souhrnem informací o výrobě, které byly popsány v předchozích kapitolách.

parametr	T8+T10 (výrobna č.1)	T10-4.np (výrobna č.2)	T12 (výrobna č.3)	celkem
Počet panelů (ks)	243	48	199	490
Typ panelu	Longi LR5-54HPH 415 Wp			
Orientace a sklon panelů	V-Z, $\gamma_v = 63^\circ$, $\gamma_z = 243^\circ$, sklon $\beta = 10^\circ$			
Typ nosné konstrukce	K2 Systems DOME 6			
Instalovaný výkon (kWp)	100,8	19,9	82,6	203,4
Typ střídačů	Fronius SYMO			
Topologie DC strany	String topologie			
AC výkon střídačů (kW)	100	20	82,5	202,5
Roční dodaná energie (kWh/rok)	101 708	19 242	84 788	205 738
Roční úspora nákladů na energii (Kč)	704 836	133 347	587 581	1 425 764
Investiční výdaj (Kč)	2 482 445	616 639	2 148 004	5 247 087
Roční náklady na údržbu (Kč/rok)	24 824	6 166	21 480	52 471
Prostá doba návratnosti (roky)	3,5	4,6	3,7	3,7

tab. 3.5 Celkový přehled výroby

ZÁVĚR

Práce se věnuje problematice návrhu a provedení fotovoltaických výroben kategorie B1 o instalovaném výkonu 100 kW až 1 MW. V první části práce je provedena rešerše podmínek pro paralelní připojení fotovoltaické výrobní k distribuční soustavě. Byly zkoumány požadavky na chování výrobní v síti a její reakce na změnu provozních veličin, provedení rozpadového místa a požadavky na dálkové řízení a výměnu dat.

Druhá část práce se věnuje samotnému návrhu vnořené fotovoltaické výrobní na budovách areálu FEKT. Nejprve je zde provedena analýza objektů pro instalaci výroben. Vhodnost daného objektu byla posuzována především z pohledu prostorových možností střechy pro instalaci fotovoltaických panelů. Jako vhodné byly vybrány střechy objektů T8, T10 a střechy budov C a D objektu T12. Výrobní tak byla rozdělena na tři dílčí výrobní. Výrobní č.1 je umístěna na střechách objektů T8 a T10. Výrobní č.2 je umístěna na střeše nad 4.np objektu T10 a výrobní č.3 je umístěna na střechách budov C a D objektu T12, viz koordinační situační výkres. Dále byla v programu PV*SOL simulována dvě možná uspořádání panelů na střechách předmětných objektů- jižní a východo-západní (V-Z). Vzhledem k úspoře místa na rozestupech kvůli zastínění panelů v jižním uspořádání bylo na dané ploše střech při použití V-Z uspořádání možné docílit cca 1,8x vyšší vyrobené energie. Pro projekt proto bylo vybráno uspořádání panelů V-Z se sklonem 10°. Použité panely Longi LR5-54HPH mají rozměr 1722x1134x30 mm a výkon 415 W_{p,STC}. Dále byl proveden výběr nosných konstrukcí a výpočet hmotnosti dodatečných zátěží pro jednotlivé bloky panelů v programu K2 BASE, který je přiložen v projektové dokumentaci.

Poté, co byl známý počet instalovaných panelů a jejich rozložení, bylo možné přistoupit k návrhu ostatních prvků výrobní. Pro přeměnu stejnosměrného proudu na střídavý byly vybrány střídače Fronius SYMO o jmenovitých výkonech 12,5 až 20 kW uspořádané ve string topologii. Každá dílčí výrobní má vlastní skupinu střídačů a vlastní rozváděče DC a AC.

DC rozváděč slouží k jištění jednotlivých stringů a je vybaven DC přepětovou ochranou. Jištění je provedeno pojistkovými odpojovací s pojistkovou vložkou.

Do rozváděčů AC jsou připojeny AC vývody střídačů. Přívod ze střídače je vybaven stykačem a jističem. Stykače slouží jako rozpadové místo elektrické sítě. AC rozváděč je dále vybaven síťovou ochranou, PLC RTU jednotkou, jednotkou pro monitoring panelů, servisními zásuvkami, tlačítkem CENTRAL STOP a přepětovou ochranou. Výkon je vyveden do NN rozváděče daného objektu. Měření výkonu je v dílčích výrobních prováděno polopřímo a je zajišťováno PLC RTU jednotkou. Měření výkonu celé vnořené výrobní bude provedeno součtem dílčích měření.

Výrobna bude přijímat a odesílat data na dispečink PDS přes PLC RTU jednotku umístěnou v dílčí výrobě č.1. PLC RTU jednotky a jednotlivé skupiny střídačů budou připojeny do sítě LAN. Propojení střídačů ve skupině je provedeno sériovou linkou v režimu master/slave.

Pro danou výrobu byla vytvořena projektová dokumentace, která se nachází v elektronické příloze této práce. Její součástí je seznam dokumentace, technická zpráva, koordinační situační výkres, položkový rozpočet a dále pro každou dílčí výrobu liniová schémata rozváděčů, výkresy rozmístění panelů, přehledová schémata zapojení a výpočet zátěží nosných konstrukcí.

Na základě celkové ceny za zřízení výroby a simulace ročního energetického zisku v programu PV*SOL byla vyhodnocena ekonomická efektivita investice. Prostá doba návratnosti pro celou výrobu je $PB = 3,7$ roku při pořizovací ceně 5 247 087 Kč bez DPH. Při výpočtu PB bylo uvažováno využití veškeré vyrobené energie v areálu VUT, což bylo potvrzeno srovnáním diagramů výroby a spotřeby objektů. Dobu návratnosti by bylo dále možno snížit využitím podpory z chystaného dotačního titulu RES+, který podporuje obnovitelné zdroje v energetice.

LITERATURA

- [1] VÝVOJ POČTU PROVOZOVEN A INSTALOVANÉHO VÝKONU PODPOROVANÝCH ZDROJŮ ENERGIE KE DNI 30. 9. 2022 [online]. Energetický regulační úřad, 2022 [cit. 2023-01-23]. Dostupné z: <https://www.eru.cz/vyvoj-poctu-provozoven-instalovaneho-vykonu-podporovanych-zdroju-energie-ke-dni-30-9-2022>
- [2] PRAVIDLA PROVOZOVÁNÍ DISTRIBUČNÍCH SOUSTAV [online]. ČEZ Distribuce, květen 2016 [cit. 2022-10-14]. Dostupné z: <https://www.cezdistribuce.cz/cs/energeticka-legislativa/pravidla-provozovani-ds>
- [3] NAŘÍZENÍ KOMISE (EU) 2016/631 ze dne 14. dubna 2016, kterým se stanoví kodex sítě pro požadavky na připojení výroben k elektrizační soustavě. In: . Evropská komise, 2016, ročník 2016.
- [4] Zákon o podmínkách podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích a o změně některých zákonů (energetický zákon). In: . 2000, sbírka č. 131/2000, 458/2000 Sb
- [5] Flicker Trouble Ahead for Solar PV Inverters? [online]. 2013 [cit. 2022-10-27]. Dostupné z: <https://www.pterra.com/photovoltaic-systems/flicker-trouble-ahead-for-solar-pv-inverters/>
- [6] ING. TOMÁŠ, Sýkora, Ph.D. Hromadné dálkové ovládání - doplnění. Praha: České vysoké učení technické v Praze Fakulta elektrotechnická Katedra elektroenergetiky, 2010.
- [7] ELVAC A.S. Elvac RTU jednotky [online]. [cit. 2022-11-16]. Dostupné z: <https://eshop.rtu.cz/>
- [8] H. Abdel-Gawad and V. K. Sood, "Overview of connection topologies for grid-connected PV systems," 2014 IEEE 27th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE), Toronto, ON, 2014, pp. 5-6.
- [9] ČSN EN 50618: Elektrické kabely pro fotovoltaické systémy. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.
- [10] ČSN 33 200-5-52 ed. 2: Elektrické instalace nízkého napětí- část 5.52: Výběr a stavba elektrických zařízení- Elektrická vedení. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [11] Ochrana před bleskem a přepětím pro střešní fotovoltaické systémy [online]. LSP, 2022 [cit. 2022-11-24]. Dostupné z: <https://www.lsp-international.com/cs/lightning-and-surge-protection-for-rooftop-photovoltaic-systems/>
- [12] ČSN CLC/TS 50539-12: Ochrany před přepětím nízkého napětí - Ochrany před přepětím pro zvláštní použití zahrnující DC - Část 12: Zásady výběru a použití - SPD připojená do fotovoltaických instalací. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.

- [13] Fronius International GmbH. Fronius SYMO datasheet [online]. [cit. 2022-12-09]. Dostupné z: <https://www.fronius.com/en/solar-energy/installers-partners/technical-data/all-products/inverters/fronius-symo/fronius-symo-20-0-3-m>
- [14] Google. [online]. 2022 [cit. 2022-12-14]. Dostupné z: <https://earth.google.com/web/>
- [15] VANĚK, Roman. Regulace napětí v distribuční soustavě. Ostrava, 2022.
- [16] HÁJEK, Jan a Dalibor ŠALANSKÝ. *První elektronická knižka o ochraně před bleskem* [online]. 2008 [cit. 2023-04-11]. Dostupné z: https://www.kniska.eu/kniska/kniska_2.1-1
- [17] ČSN EN 62305-3 ed. 2 – Ochrana před bleskem – Část 3: Hmotné škody na stavbách a ohrožení života. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, leden 2012.
- [18] ČSN 33 2000-7-712 ed.2 – Elektrické instalace nízkého napětí - Část 7-712: Zařízení jednoúčelová a ve zvláštních objektech - Fotovoltaické (PV) systémy. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, říjen 2016.
- [19] ARKYS s.r.o.- Efektivní průřez žlabů [online]. 2023 [cit. 2023-04-20]. Dostupné z: <https://www.arkys.cz/cs/efektivni-prurez-zlabu-50-mm>
- [20] ARKYS s.r.o.- Jak správně zvolit kabelové nosné systémy. Elektroprůmysl.cz [online]. 2012 [cit. 2023-04-20]. Dostupné z: <https://www.elektroprumysl.cz/elektroinstalace/jak-spravne-zvolit-kabelove-nosne-systemy>
- [21] SFŽP ČR. O Modernizačním fondu [online]. 2023 [cit. 2023-04-24]. Dostupné z: <https://www.sfzp.cz/o-modernizacnim-fondu/>
- [22] ENOVATION S.R.O. Nové obnovitelné zdroje v energetice - RES+ [online]. 2023 [cit. 2023-04-24]. Dostupné z: <https://www.enovation.cz/eu-dotace/operacni-program/modernizacni-fond/nove-obnovitelne-zdroje-v-energetice-res-mod-fond/>
- [23] SFŽP ČR. Program pro poskytování podpory z prostředků Modernizačního fondu: Nové obnovitelné zdroje v energetice (RES+). 2021.

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

ES	Elektrizační soustava
PPDS	Pravidla provozování distribučních soustav
FVE	Fotovoltaická elektrárna
VM	Výrobní modul
VN	Vysoké napětí
PPS	Provozovatel přenosové soustavy
PDS	Provozovatel distribuční soustavy
NN	Nízké napětí
VN	Vysoké napětí
VVN	Velmi vysoké napětí
DTS	Distribuční trafostanice
MTN	Měřicí transformátor napětí
MTP	Měřicí transformátor proudu
OZ	Opětovné zapnutí
HDO	Hromadné dálkové ovládání
STC	Standard testing conditions (standartní testovací podmínky)
A	Ampér
MVA	Megavoltampér
LPS	Lightning protection system (systém ochrany před bleskem)
LCOE	Levelized cost of energy (celkové náklady na energii)
ERÚ	Energetický regulační úřad
V-Z	Východo-západní
STC	Standard testing conditions (standartní testovací podmínky)
NOCT	Nominal operating cell temperature

Symboly:

S	Zdánlivý výkon
S_{kV}	Zdánlivý výkon výroby
P	Činný výkon

P_{inst}	Instalovaný výkon
P_{max}	Maximální výkon výrobní
Q	Jalový výkon
f	Frekvence
U	Napětí
ΔU	Změna napětí
U_{DC}	Napětí na DC straně
$U_{OC\ NOCT}$	Napětí panelu naprázdno při NOCT
$U_{OC\ STC}$	Napětí panelu naprázdno při STC
n_U	Ideální počet panelů zapojených v sérii z hlediska MPPT
$n_{U,MAX}$	Maximální počet sériově zapojených panelů ve stringu
n_I	Maximální počet paralelně zapojených stringů
I	Proud
I_{MAX}	Maximální proud nakrátko MPPT
$I_{SC\ MAX}$	Maximální zkratový proud panelu
I_n	Fiktivní proud pro volbu průřezu
$I_{\mu,př}$	Proud harmonických
$i_{\mu,př}$	Vztažný proud harmonických
I_{1f}	Proud jedné fáze
$\cos\varphi$	Účinník
v	Celočíselný řád harmonické frekvence
μ	Neceločíselný řád harmonické frekvence
s	Dostatečná vzdálenost od vnějšího LPS
k_i	Koeficient závislý na zvolené třídě LPS
k_b	Bezpečnostní koeficient
k_1	Koeficient proudové zatížitelnosti pro různé teploty okolí
l	Délka v metrech podél jímací soustavy a svodu LPS
n	Celočíselný počet
β	Sklon panelu
γ	Azimut (sever = 0°)
PB	Prostá doba návratnosti
K_i	Investiční výdaj
CF	Roční úspora nákladů
E_r	Roční dodaná energie
n_{EE}	Cena za elektrickou energii
$N_{údr}$	Roční náklady na údržbu

A.1 Obsah elektronické přílohy

000_SEZNAM DOKUMENTACE
001_TECHNICKÁ ZPRÁVA
003_KOORDINAČNÍ SITUAČNÍ VÝKRES
004_ŘEZ NOSNOU KONSTRUKCÍ
005_POLOŽKOVÝ ROZPOČET
T8+T10_201_ROZMÍSTĚNÍ PANELŮ T8
T8+T10_202_ROZMÍSTĚNÍ PANELŮ T10
T8+T10_301_RDC_T8
T8+T10_302_RAC_T8
T8+T10_401_PŘEHLEDOVÉ SCHÉMA
T8+T10_501_VÝPOČET ZÁTĚŽÍ NOSNÝCH KONSTRUKCÍ
T12_201_ROZMÍSTĚNÍ PANELŮ T12C
T12_202_ROZMÍSTĚNÍ PANELŮ T12D
T12_301_RDC_T12
T12_302_RAC_T12
T12_401_PŘEHLEDOVÉ SCHÉMA
T12_501_VÝPOČET ZÁTĚŽÍ NOSNÝCH KONSTRUKCÍ
T10-4.NP_201_ROZMÍSTĚNÍ PANELŮ
T10-4.NP_301_RDC_T10-4.NP
T10-4.NP_302_RAC_T10-4.NP
T10-4.NP_401_PŘEHLEDOVÉ SCHÉMA
T10-4.NP_501_VÝPOČET ZÁTĚŽÍ NOSNÝCH KONSTRUKCÍ

tab. 3.6 Obsah elektronické přílohy