

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**  
**KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Jištění fotovoltaických zdrojů**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2015/2016

**ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**  
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Petr ZOBAL**  
Osobní číslo: **E14N0075P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektroenergetika**  
Název tématu: **Jištění fotovoltaických zdrojů**  
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Uveďte způsoby provozu fotovoltaických zdrojů a podmínky jejich připojitelnosti k distribuční síti.
2. Popište vlastnosti fotovoltaických článků a panelů, uveďte jejich základní provozní charakteristiky a důležité provozní parametry.
3. Uveďte způsoby jištění stejnosměrných rozvodů fotovoltaické elektrárny s ohledem na poruchy a extrémní provozní stavy fotovoltaických panelů.
4. Posudte jištění a volbu průřezu vedení pro připojení fotovoltaické elektrárny k síti s ohledem na provozní náklady.
5. Na modelovém příkladu fotovoltaické elektrárny proveďte návrh a jištění stejnosměrných rozvodů a přípojného kabelu.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická


Seznam odborné literatury:

1. Příručka elektrotechnika - Jisticí přístroje I a II, firemní materiály OEZ, 2012
2. ČSN 332000-5-523 Elektrická zařízení, část 5 Výběr a stavba el. zařízení - Dovolené proudy
3. Pravidla provozování distribučních soustav, 2011

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Miloslava Tesařová, Ph.D.**  
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2015**

Termín odevzdání diplomové práce: **16. května 2016**

  
Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.  
děkan



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

V Plzni dne 15. října 2015

## **Abstrakt**

Předmětem diplomové práce je přiblížit problematiku jištění fotovoltaických zdrojů a navrhnout na modelovém příkladě jištění stejnosměrných a střídavých rozvodů a přípojného kabelu. Práce obsahuje základní parametry a charakteristiky fotovoltaických článků a panelů. Dále jsou zde uvedeny možnosti provozu fotovoltaických zdrojů a uvádí podmínky připojitelnosti do distribuční soustavy. Druhou hlavní částí jsou způsoby jištění stejnosměrných rozvodů s ohledem na poruchy a extrémní provozní stavy fotovoltaických panelů. Poslední částí je posoudit jištění a volbu průřezu vedení pro připojení fotovoltaické elektrárny s ohledem na provozní náklady. V návaznosti na to, na modelovém příkladě fotovoltaické elektrárny je proveden kompletní návrh jištění stejnosměrných rozvodů, střídavých rozvodů a přípojného kabelu.

## **Klíčová slova**

jištění, dimenzování, fotovoltaický článek, fotovoltaický zdroj

**Abstract**

The subject of the thesis is to bring the issue of protection of photovoltaic sources and to design protection of DC and AC wiring and connecting cable of a photovoltaic source. The thesis contains basic parameters and characteristics of photovoltaic cells and panels. Furthermore, there are presented operating modes of photovoltaic power plants and conditions for connectivity to the grid. The next part deals with methods for protection of DC wirings with respect to disturbances and extreme operating conditions of photovoltaic panels. The last part deals with protection and the choice of cable cross-section for connecting photovoltaic power plants with regard to operating costs. Following this, design of DC and AC wiring protection and connecting cable of a PV plant is made.

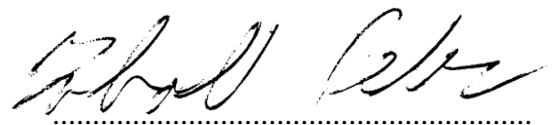
**Key words**

protection, dimensioning, photovoltaic cell, photovoltaic source

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Petr Zobal', written over a horizontal dotted line.

podpis

V Plzni dne 5.5.2016

Petr Zobal

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval své vedoucí diplomové práce doc. Miloslavě Tesařové, Ph.D. za cenné rady a připomínky při konzultování mé práce.

## Obsah

<b>OBSAH.....</b>	<b>8</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>9</b>
<b>1. ÚVOD.....</b>	<b>12</b>
<b>2. ZÁKLADY FOTOVOLTAIKY.....</b>	<b>12</b>
2.1 HISTORIE .....	12
2.2 PRINCIP FOTOVOLTAICKÉHO ČLÁNKU .....	14
2.3 DRUHY FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ .....	15
2.4 PARAMETRY FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ .....	16
2.4.1 VA charakteristika.....	17
2.4.2 Fotovoltaické panely.....	18
<b>3. PROVOZ FVE .....</b>	<b>20</b>
3.1 ZPŮSOBY PROVOZU.....	20
3.2 PODMÍNKY PŘIPOJITELNOSTI DO DS .....	22
<b>4. JIŠTĚNÍ FVE.....</b>	<b>28</b>
4.1 NÁZVOSLOVÍ .....	28
4.2 ZPŮSOBY JIŠTĚNÍ STEJNOSMĚRNÝCH ROZVODŮ .....	28
4.3 JIŠTĚNÍ A VOLBA PRŮŘEZU VEDENÍ .....	34
<b>5. MODELOVÝ PŘÍKLAD FVE .....</b>	<b>43</b>
5.1 DIMENZOVÁNÍ A JIŠTĚNÍ STEJNOSMĚRNÝCH ROZVODŮ.....	43
5.2 DIMENZOVÁNÍ A JIŠTĚNÍ PŘÍPOJNÉHO KABELU A STRÍDAVÝCH ROZVODŮ .....	46
5.3 OVĚŘENÍ OCHRANY PROTI NEBEZPEČNÉMU DOTYKU .....	56
5.4 EKONOMICKÁ OPTIMALIZACE PRŮŘEZU KABELU RX - M.....	58
<b>6. ZÁVĚR .....</b>	<b>60</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....</b>	<b>62</b>
<b>PŘÍLOHY .....</b>	<b>1</b>



## Seznam symbolů a zkratek

AC.....	střídavý
c.....	koeficient respektující zvýšené napětí o 10% (-)
CdTe .....	Cadmium Tellurid = telurid kademnatý
CIS .....	Copper-Indium-diSelenid = dvojselenid mědi-india
cos $\varphi$ .....	účinník (-)
DC.....	stejnoseměrný
DS .....	distribuční soustava
f.....	frekvence (Hz)
FV .....	fotovoltaický
FVE.....	fotovoltaická elektrárna
FVZ.....	fotovoltaický zdroj
HR.....	hlavní rozvaděč
I.....	proud (A)
$I_1$ .....	jmenovitá vypínací schopnost pojistky VN (A)
$I_2$ .....	první bod přetěžovací charakteristiky (A)
$I_{cm}$ .....	jmenovitá zkratová zapínací schopnost
$I_{cu}$ .....	jmenovitá mezní zkratová vypínací schopnost
$I_{cw}$ .....	jmenovitý krátkodobý výdržný proud
$I_f$ .....	tavný proud pojistky (A)
$I_i$ .....	proud v čase 5s odečtený z vypínací charakteristiky jističe (A)
$I_k$ .....	proud nakrátko, zkratový proud (A)
$I_k''$ .....	zkratový proud proud (A)
$I_{MOD\_REVERSE}$ .....	maximální možný zpětný proud modulu (A)
$I_{MPP}$ .....	proud v bodě maximálního výkonu (A)
$I_{MR}$ .....	proud od měniče k podružnému rozvaděči (A)
$I_{nf}$ .....	smluvený krajní proud pojistky (A)
$I_{Np}$ .....	jmenovitý proud pojistky (jističe) (A)
$i_p$ .....	nárazový zkratový proud (A)
$I_p$ .....	výpočtový proud (A)
$I_P$ .....	proud pole (A)
$I_{\dot{R}}$ .....	proud řetězce (A)
$I_{th}$ .....	ekvivalentní oteplovací proud (A)

K .....	konstanta respektující materiál jádra a izolace pro výpočet minimálního průřezu (-)
$k_e$ .....	součinitel pro výpočet ekvivalentního oteplovacího proudu (-)
$K_p$ .....	činitel přiřazení jistícího prvku (-)
$l$ .....	délka vodiče (m)
$L$ .....	indukčnost (mH/km)
$m$ .....	součinitel pro tepelné účinky stejnosměrné složky zkratového proudu (-)
MPP .....	Maximum Power Point = bod maximálního výkonu
$n$ .....	součinitel pro tepelné účinky střídavé složky zkratového proudu (-)
NN.....	nízké napětí
$o$ .....	sluneční ozáření ( $W/m^2$ )
OZE.....	obnovitelné zdroje energie
$P$ .....	výkon (W)
PDS .....	provozovatel distribuční soustavy
$\Delta P_k$ .....	ztráty transformátoru nakrátko (W)
$P_M$ .....	výkon měniče (W)
$P_{max}$ .....	maximální výkon (W)
$P_P$ .....	výkon pole (W)
PPDS.....	Pravidla provozování distribuční soustavy
$P_S$ .....	spotřebovaný výkon (W)
$P_V$ .....	vyrobený výkon (W)
PV .....	fotovoltaický ( z angl. photovoltaic)
$r_g$ .....	koeficient respektující teplotu vodiče 70°C
$R_k$ .....	činný odpor vodiče ( $\Omega/km$ )
$R_x$ .....	podružné rozvaděče R1 - R10
$S$ .....	plocha ( $m^2$ )
$S_k''$ .....	zkratový výkon (VA)
$t_k$ .....	doba trvání zkratu (s)
$U$ .....	napětí (V)
$U_f$ .....	fázové napětí (V)
$u_k\%$ .....	napětí nakrátko (%)
$U_{MPP}$ .....	napětí v bodě maximálního výkonu (V)
$U_N$ .....	jmenovité napětí (V)

---

$U_{Np}$ .....	jmenovité napětí pojistky (jistice) (V)
$U_0$ .....	napětí naprázdno (V)
$U_{\dot{R}}$ .....	napětí řetězce (V)
VA .....	volt-ampér
VN .....	vysoké napětí
$X_k$ .....	reaktance vodiče ( $\Omega/\text{km}$ )
$Z_s$ .....	impedance smyčky
$Z_s(t_{\max})$ .....	maximální možná impedance smyčky
$\kappa$ .....	součinitel pro výpočet nárazového zkratového proudu (-)
$\eta$ .....	účinnost (-), (%)

## 1. Úvod

Fotovoltaický článek již známe od 19. století. Ovšem největší rozmach fotovoltaických zdrojů (FVZ) nastal v posledních 10 letech. Fotovoltaické elektrárny (FVE) stejně jako jiné elektrárny, zdroje a jiná zařízení je nutné chránit proti vnitřním i vnějším poruchám, zkratům a přetížením a jiných jevům, které by mohli poškodit zařízení. Právě touto problematikou jištění a ochranou fotovoltaických zdrojů se zabývá tato práce. Pro ujasnění základních pojmů a principů jsou ve druhé kapitole zmíněny základní vlastnosti fotovoltaických článků a panelů. Jsou zde reprezentovány jejich základní charakteristiky a provozní parametry. Možnosti provozu a spolu s tím podmínky na připojení a provozování FVE spolu s distribuční soustavou (DS) jsou uvedeny ve třetí kapitole. Zde jsou také aktuální informace z nově vydaných norem. Další bod práce se zaměřuje na způsoby jištění stejnosměrných rozvodů fotovoltaické elektrárny. Přitom bereme ohled na možné poruchy a extrémní provozní stavy. V této části je řešen také průřez vedení pro připojení FVE k síti. Při návrhu jištění a volbě průřezu kabelu je potřeba brát ohled na pořizovací a provozní náklady.

Praktická část práce se zabývá kompletním návrhem jištění fotovoltaické elektrárny a dimenzováním vedení na straně stejnosměrné (DC) i střídavé (AC). Řešený typ FVE vychází ze skutečně fungující FVE.

## 2. Základy fotovoltaiky

Cílem této kapitoly je dát přehled základním parametrům a pojmům, které se ve fotovoltaice používají. V této kapitole je stručně vysvětlen princip fotovoltaického článku, dále je zde přehled typu fotovoltaických článků a v poslední části kapitoly jsou uvedeny parametry PV článku (z angl. photovoltaic) včetně Volt - Ampérové (VA) charakteristiky a způsobu zvyšování těchto parametrů.

### 2.1 Historie

Historie fotovoltaického článku se datuje od roku 1839, kdy francouzský fyzik Alexander Edmond Becquerel jako první objevil fotoelektrický jev. Konkrétně fotoelektrický jev vnější (fotoemise). Dále lze rozlišit další dvě formy fotoelektrického jevu, a to fotovoltaický jev, kterým se budeme zabývat, při kterém elektrony setrvávají v materiálu a fotoionizaci. Ovšem první fotovoltaický článek zkonstruovali roku 1877 W. G. Adams a R. E. Day a právě oni poprvé pozorovali fotovoltaický jev. Následoval je v roce 1883 americký vědec Charles Fritts. Jeho fotovoltaický článek disponoval účinností menší než 1%. Vzhledem ještě v té době

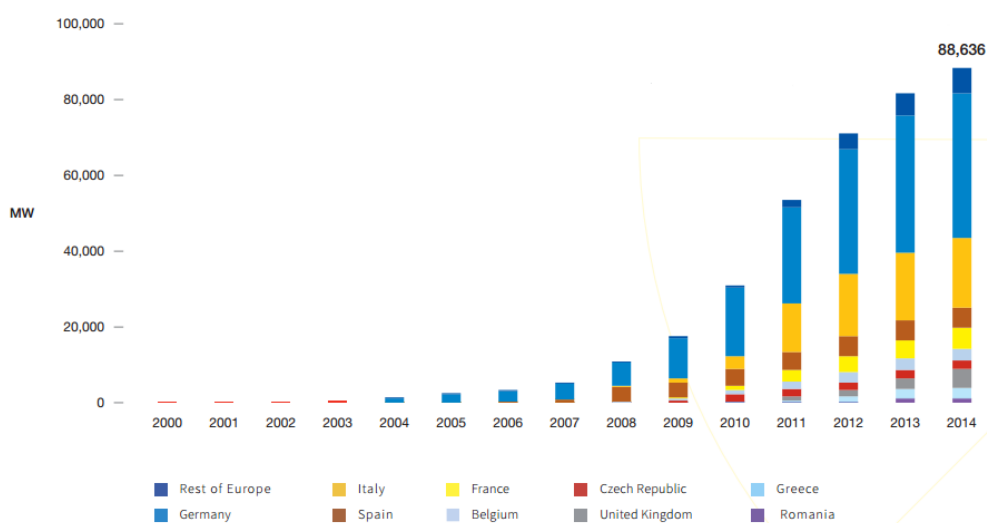
neznalosti fyzikálního principu fotoelektrického jevu byl vývoj velmi pomalý. Průlom nastal roku 1905, kdy fyzikální princip fotoelektrického jevu objasnil Albert Einstein, za což dostal roku 1921 Nobelovu cenu za fyziku. V roce 1946 si fotovoltaický článek z křemíku nechal v USA patentovat Russel S. Ohl. Jeho fotovoltaické články měly účinnost okolo 1%. Až v roce 1954 byly vyrobeny první fotovoltaické články schopné vyrábět elektřinu a jejich účinnost byla přibližně 6%.

Vývoj fotovoltaických článků, i tak nebyl snadný. Cena byla velmi vysoká, a proto se fotovoltaické články používaly zatím pouze tam, kde cena nehrála roli. Odvětví, kde se jako první využívalo PV článků byla kosmonautika, popřípadě aplikace, kam nebylo možné přivést jiným způsobem elektřinu. Velký rozvoj solárních článků nastal v 70. letech. Došlo k rozvoji polovodičových součástek a nastalo rozšíření výroby křemíku. Postupem času se cena PV článků snížila natolik, že se solární články začaly vyskytovat téměř všude od kalkulaček až po solární články pro budovy.

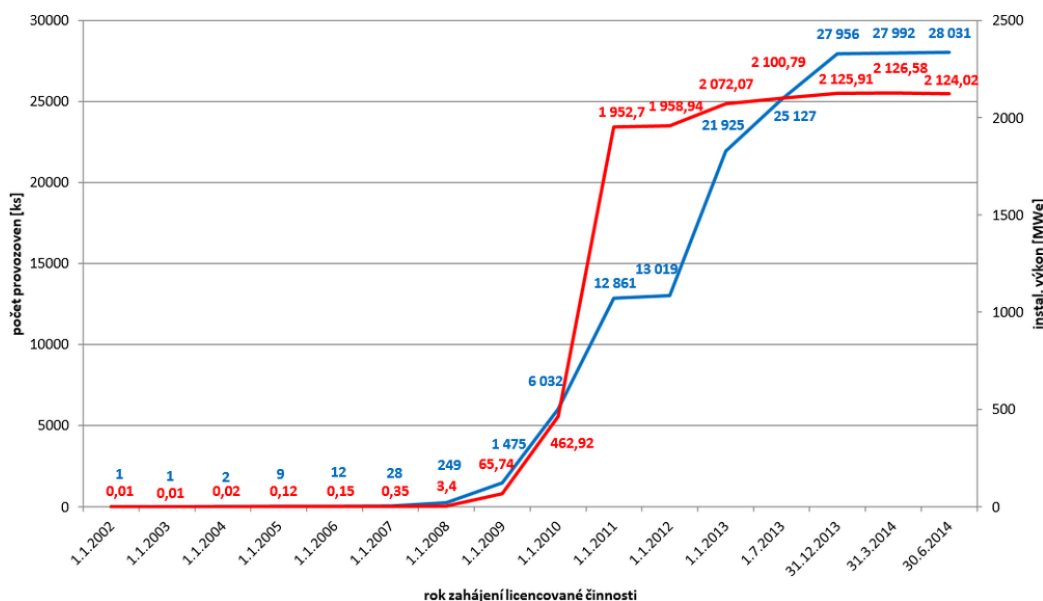
Největší "boom" nastal v roce 2010 viz *Obr. 2.1*, kdy se instalovaný výkon z FVE v Evropě dostal na 30GW. V roce 2014 dosahoval instalovaný výkon v Evropě téměř 90GW. Z grafu je patrné, že největším producentem elektrické energie z fotovoltaiky je Německo, které preferuje hlavně OZE. V České republice instalovaný výkon dosáhl téměř 2GWe, a to hlavně díky dotaci s názvem "Zelená úsporám". Vývoj inst. výkonu v ČR je na *Obr. 2.2*.

Výroba elektrické energie z fotovoltaiky stále narůstá a pravděpodobně poroste i nadále, což způsobuje řadu problémů v přenosové soustavě. V ČR lze očekávat v roce 2016 další velký nárůst FV zdrojů díky další připravované dotaci, tentokrát s názvem "Nová zelená úsporám".

Tato kapitola byla zpracována na základě informací z níže uvedených zdrojů [1], [2] [4].



Obr. 2.1 Vývoj instalovaného výkonu z FV zdrojů v roce 2000 - 2014[5]

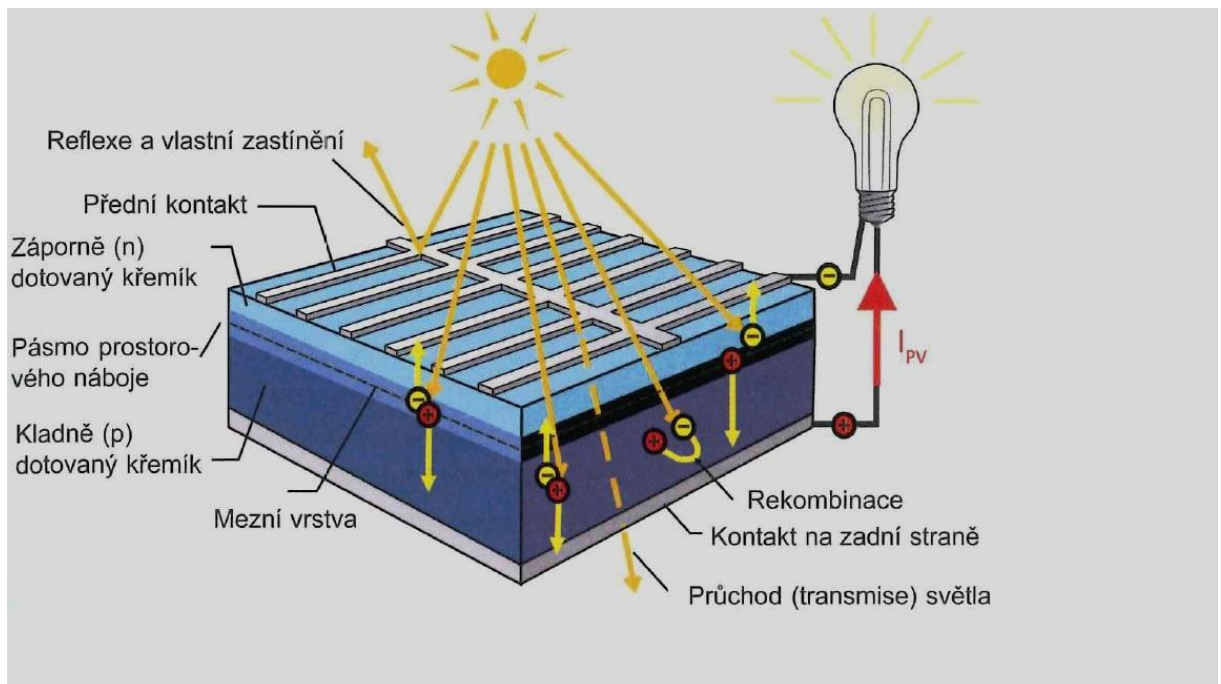


Obr. 2.2 Vývoj instalovaného výkonu FVE (červená) a počtu jednotlivých provozoven (modrá) k 30. 6. 2014 [6]

## 2.2 Princip fotovoltaického článku

Základem získávání energie z fotovoltaických článků je přeměna sluneční energie na energii elektrickou. Fotovoltaické články jsou z polovodičů, kde je používán nejčastěji křemík. Fotovoltaický článek využívá podobně jako dioda PN přechodu. Na rozdíl od klasické diody je u PV článků spouštěčem průchodu elektrického proudu světlo.

Krystalický solární článek je složen ze dvou křemíkových vrstev. Záporná vrstva je dotována fosforem, je opatřena elektrodou pro vedení proudu a musí co nejvíce propouštět světelné záření. Kladná vrstva je dotována bórem a elektroda je řešená celoplošně, protože umístěna ve spodní straně a není nutné řešit průchod světla. Nutné je aby článek světlo propouštěl a minimálně se odráželo, to zajišťuje antireflexní vrstva. Na panelech můžeme pozorovat černou nebo modrou barvu. Lze tak poznat jakého typu jsou použité PV články. Je-li článek černý, jedná se o monokrystalický článek a v případě modré barvy se jedná o polykrystalický článek. Celá konstrukce fotovoltaického článku spolu s principem činnosti je zobrazena na Obr. 2.3.



Obr. 2.3 Konstrukce a přeměna energie v krystalickém křemíkovém solárním článku [3]

Při dopadu fotonu se v pravidelné krystalické mřížce uvolní z vazby pohybující se elektron. Po uvolnění elektronu zůstane na jeho místě kladný náboj. Nyní nastane jejich pohyb. Elektrony jdou směrem k přední straně a naopak protony jdou k zadní straně. Vznikne rozdíl potenciálů a tím napětí naprázdno, které je přibližně 0,6 - 0,7V podle typu článku. Připojíme - li zátěž, obvod se uzavře a začne protékat elektrický proud. Ovšem ne všechny elektrony dojdou až ke kontaktu, některé rekombinují a ty se pak na vedení elektrického proudu nepodílí.

Na fotovoltaickém článku dochází k mnoha druhům ztrát. Těmito ztrátami jsou například ztráty zastíněním předních kontaktů, ztráty odrazem, malá energie fotonů dlouhovlnného záření nebo naopak velká energie fotonů krátkovlnného záření, již zmíněná rekombinace a tepelné ztráty. Sečteme - li všechny tyto ztráty, tak výsledná účinnost solárního článku je přibližně 15%. Dnes nejlepší články pro komerční využití, co do účinnosti, jsou články s účinností cca 20%.

### 2.3 Druhy fotovoltaických článků

Mezi základní typy článků patří monokrystalický článek, polykrystalický článek a tenkovrstvý článek. Všechny články se liší svou konstrukcí, způsobem výroby a výslednou účinností.

### **Monokrystalický článek**

Jedná se o velmi rozšířený druh článku. Vyrábí se většinou jako čtvercové s délkou hrany 10 - 15cm. Tyto články můžeme rozpoznat podle jejich tmavě modré až černé barvy. Průměrná účinnost se pohybuje mezi 15 - 17%, maximálně až 21%.

### **Polykrystalický článek**

Na rozdíl od monokrystalického článku, nejsou vytvořeny z jednoho celistvého krystalu, ale krystaly mají různou orientaci, což je dáno technologií výroby. Výsledná barva je třpytivě modrá s různou strukturou. Nejčastěji jsou opět čtvercové s hranami 10 až 21 centimetrů. Výroba těchto článků je jednodušší a levnější, a to se odráží i na účinnosti, která je 13 - 16%.

### **Tenkovrstvé články**

Důvod k výrobě těchto článků byla stále vysoká cena výroby mono a polykrystalických článků. I přes různé obtíže bylo dosaženo pozitivních výsledků. Výrobní cena klesla a řada vlastností se zlepšila. Účinnost ovšem poklesla přibližně na polovinu oproti krystalickým. Tuto nevýhodu je možné vykompenzovat osazením větší plochy tenkovrstvými články. Tenkovrstvé články se vyrábí v různých typech. Mezi ně patří amorfní křemíkové články, mikromorfní křemíkové články, články technologie CIS (dvojselenid mědi-india) nebo články na bázi teluridu kademnatého (CdTe). Právě články CIS a články na bázi CdTe mají nejvyšší účinnost z tenkovrstvé technologie a budou se tyto technologie dále rozšiřovat na trhu.

Kapitoly 2.2 a 2.3 byla zpracována na základě informací z níže uvedených zdrojů [3] a znalostí absolvovaného studia.

## **2.4 Parametry fotovoltaických článků**

Nejdůležitějším parametrem u PV článků je výkon. Ten je samozřejmě spjat s napětím a proudem, jak udává rovnice 2.1.

$$P = U \cdot I \text{ (W)} \quad (2.1)$$

Na výkon článku má vliv několik okolních vlivů. Těmito vlivy jsou například intenzita ozáření, teplota článku nebo spektrum světla. Je logické, že s rostoucí intenzitou ozáření nám výkon článků vzrůstá. Naopak teplota má opačný efekt. Čím vyšší teplota, tím nižší výkon. Spektrum světla obsahuje různé vlnové délky a každý typ článku využívá různých vlnových délek.

Zvýšení výkonu, potažmo účinnosti lze využít například použitím speciálních vrstev, které více propouští světlo nebo také použitím průhledných elektrod či oboustrannými moduly, které umí využít světlo i odražené. Pro zvýšení intenzity záření je možné použít natáčející se panely.



Dalším podstatným parametrem je účinnost. Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.3, účinnost je závislá na zvoleném typu článku. Účinnost lze vypočítat pomocí vztahu 2.2.

$$\eta = \frac{P_{max}}{S \cdot o} \cdot 100 (\%) \tag{2.2}$$

,kde

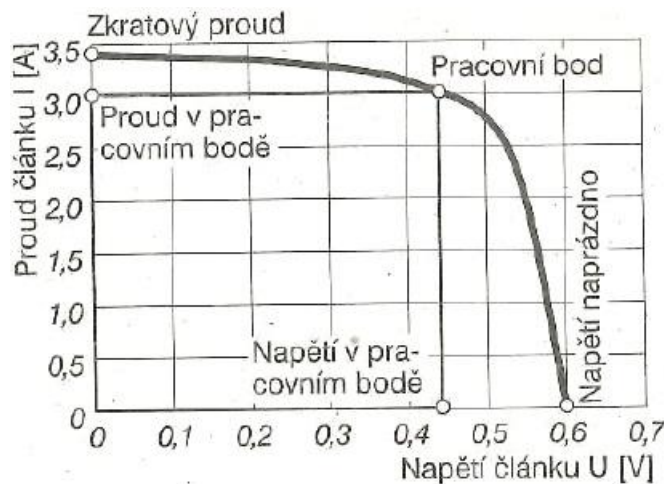
$P_{max}$ ..... maximální hodnota výkonu [W]

$S$ ..... plocha článku [ $m^2$ ]

$o$  ..... sluneční ozáření [ $W/m^2$ ] - při výpočtu účinnosti se používá hodnota  $1000W/m^2$

### 2.4.1 VA charakteristika

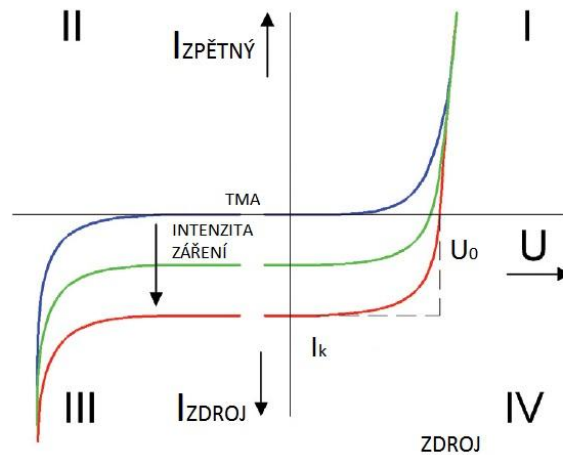
Pro popis parametrů fotovoltaického článku je nejvhodnější použít V-A charakteristiku. Ta je znázorněná na Obr. 2.4 a kompletní VA charakteristika zobrazená ve čtyřech kvadrantech je na Obr. 2.5.



Obr. 2.4 VA charakteristika fotovoltaického článku [2]

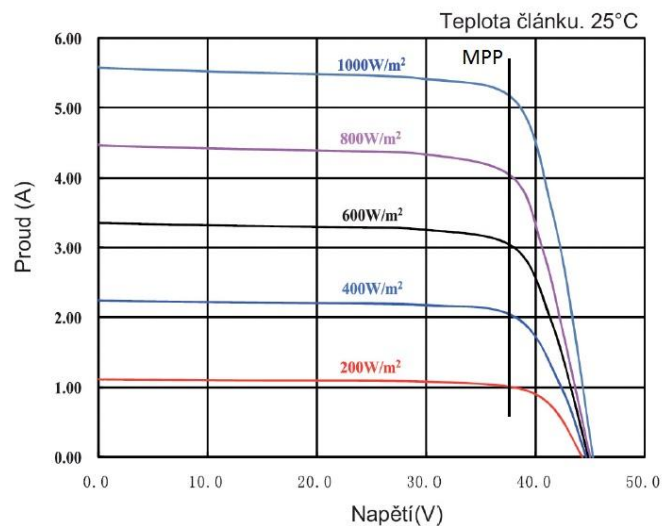
Největší napětí, které můžeme z článku dostat je napětí naprázdno (zdroj bez zatížení, rozpojené svorky), které závisí na použitém materiálu. Nejčastěji se používá křemík a hodnota napětí naprázdno  $U_0 = 0.6V$ . Největší proud získáme, pokud je článek zapojen do zkratu bez zátěže. Ten je závislý na velikosti PV článku a intenzitě osvětlení. Nejvyššího zkratového proudu se dosahuje až  $I_k = 6A$ .

Ovšem těchto hodnot využívat nemůžeme, protože jak je patrné z charakteristiky, výsledný výkon by byl nulový. Hledá se tedy optimální bod, známý pod anglickou zkratkou MPP - Maximum Power Point = bod maximálního výkonu. Bod je určen  $U_{MPP}$  a  $I_{MPP}$ . Toto je pracovní bod, ve kterém chceme, aby článek popřípadě celý modul pracoval. Tento bod můžeme nalézt přibližně v kolenu charakteristiky, kde při určitém napětí proud razantně klesá.



Obr. 2.5 VA charakteristika fotovoltaického panelu [10]

Na Obr. 2.6 je VA charakteristika s přímkou, která určuje body MPP pro různé intenzity osvětlení.

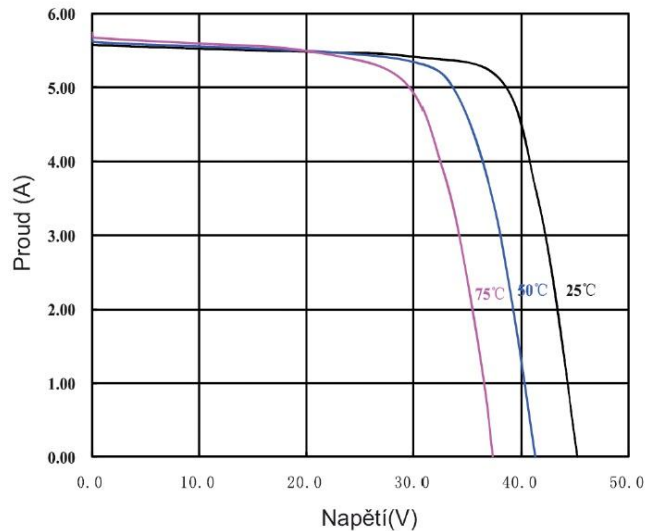


Obr. 2.6 VA charakteristika PV panelu s křivkou MPP pro různé intenzity osvětlení [10]

## 2.4.2 Fotovoltaické panely

V praxi nelze využít pouze jeden fotovoltaický článek kvůli jeho malým hodnotám napětí a proudu, a proto je nutné tvořit sério - paralelní kombinaci článků pro dosažení potřebných parametrů. Při zapojování článků do série zvyšujeme napětí. Běžně dostupné panely jsou s 36 - 72 články zapojenými do série, což dává výsledné napětí při napětí 0,5V na jeden článek 18V - 36V na řetězec. Stejně velké řetězce se dále zapojují ještě paralelně, abychom dosáhli vyššího proudu. Takto vznikne výsledný fotovoltaický panel.

Laik by řekl, že čím více slunce a větší teplo tím lépe. To není úplně tak pravda, protože s větší teplotou nám klesá napětí, snižuje se výkon a tím i účinnost viz Obr 2.7. V některých horkých oblastech je dokonce nutné panely chladit.



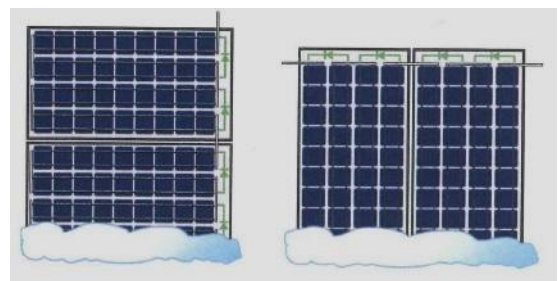
Obr. 2.7 VA charakteristika PV panelu při různých teplotách [10]

Problém nastává, pokud se na PV panel dostane stín. Máme-li částečně zastíněný sériový řetězec článků, produkuje každý článek rozdílný proud. V sériovém řetězci musí téci stejný proud, a to je proud, který je nejnižší od daného článku. Situace může být až natolik kritická, že proud, který produkují zbylé články, se mění na teplo, které může být tak velké, že dojde k poškození či dokonce až zničení celého modulu. Aby se zabránilo tomuto efektu, využívá se bypass. Ten je zde řešen obtokovou diodou, která v případě zastínění některého článku je schopná přemostit až 18 článků. Při montáži na střechu je nutné také zvážit orientaci umístění, zda vodorovně nebo svislé. Vodorovným umístěním snížíme ztráty při zasněžení. VA charakteristiku s využitím bypassu a orientaci se zapojením bypassu ukazují Obr. 2.8 a Obr. 2.9.

Tato kapitola byla zpracována na základě informací z níže uvedených zdrojů [1], [2], [3] a znalostí absolvovaného studia.



Obr. 2.8 VA charakteristika PV panelu s použitím a bez použití obtokové diody [3]



Obr. 2.9 Vliv zasněžení na vodorovné uspořádání (vlevo) a svislé uspořádání (vpravo) [3]

### 3. Provoz FVE

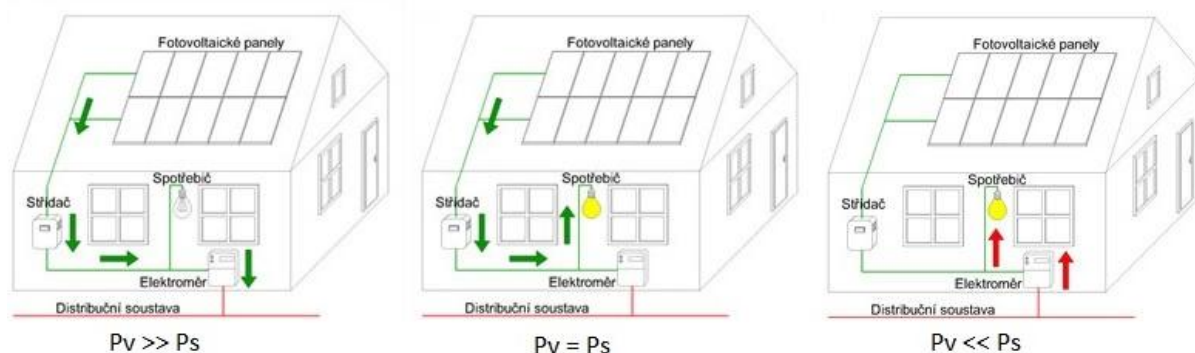
V této kapitole se zaměříme na možnosti provozování fotovoltaické elektrárny a spolu s tím souvisí podmínky připojitelnosti k distribuční soustavě.

#### 3.1 Způsoby provozu

Existují tři základní typy provozu fotovoltaického zdroje, které jsou postupně popsány. Jsou jimi FVE spolupracující s DS, FVE pracující v ostrovním režimu a FVE hybridní. Každý způsob provozování má svoje výhody a nevýhody. Pro jednoduchost je princip fungování vysvětlen na domě s fotovoltaickým zdrojem.

##### a) FVE spolupracující s DS

Celý systém se skládá z fotovoltaických panelů, střídače, spotřebičů, elektroměru a přípojky k DS. Při tomto provozu může nastat několik situací, všechny jsou znázorněny na Obr. 3.1. První možností je vysoká výroba, ale odběr je téměř nulový, tudíž všechna energie směřuje do distribuční soustavy  $P_V \gg P_S$  (poledne => nejvyšší výroba, nikdo není doma, nulová spotřeba). Druhou možností je opět vysoká výroba, ale nyní už je větší odběr ovšem stále  $P_V > P_S$ . Přebytečný výkon jde opět do DS. Třetí a nejlepší možností že je výroba stejná jako spotřeba,  $P_V = P_S$ . Čtvrtá varianta je opak druhé varianty. Výroba nepokryje zcela spotřebu a část energie je nutné brát z DS,  $P_V < P_S$ . Poslední variantou je nulová výroba elektřiny z FVZ (například v noci) a veškerý výkon je přiváděn z DS,  $P_V \ll P_S$ .



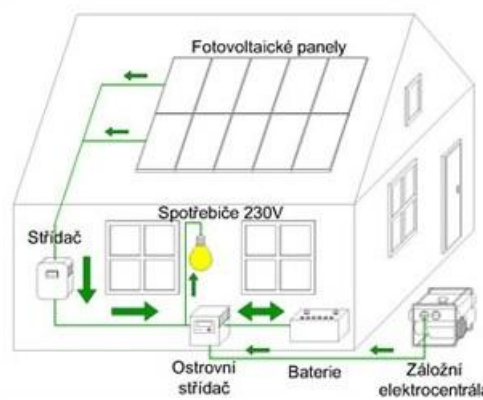
Obr. 3.1 Schéma FVE spolupracující s DS - různé možné stavy [7]

Pokud bychom chtěli takto provozovat FVE je nutné mít povolení distribuční společnosti, uzavřít smlouvu o výkupu dodávané elektrické energie a splnit podmínky připojitelnosti do DS, které jsou uvedeny v podkapitole 3.2. Je zakázáno, aby FVZ pracoval při výpadku elektrické energie v distribuční síti, tudíž pokud dojde k výpadku, FVZ se musí automaticky odpojit. Pro největší úsporu energie je vhodné nastavit spotřebiče (myčka, pračka, filtrace)

tak, aby se spouštěli v době největší výroby FVZ.

**b) FVE pracující v ostrovním režimu**

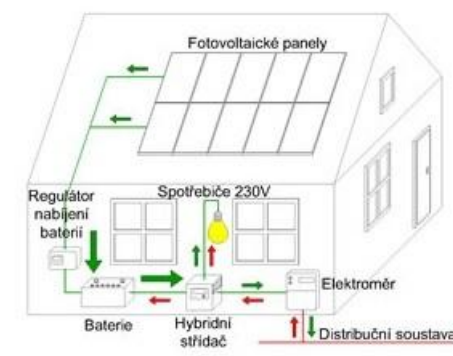
Pro provoz FVE v ostrovním režimu není nutné žádné povolení. Jedná se o samostatnou jednotku. V nejjednodušším případě se skládá pouze z fotovoltaických panelů, regulátoru dobíjení baterie, baterie a spotřebiče. To stačí pouze v minimum případů, například pro kempování či jachty na moři, už kvůli tomu, že panely generují stejnosměrné napětí na hladinách 12 nebo 24V. V složitějších případech je systém dále obohacen o střídač, usměrňovač a elektrocentrálu viz *Obr. 3.2*. Přes den je přebytečnou energií nabíjen akumulátor, který slouží k napájení spotřebičů v době, kdy PV panely nevyrobí elektrinu. Elektrocentrála slouží jako záložní napájení v případech, kdy se nestačily nabít akumulátory.



*Obr. 3.2 Schéma FVE v ostrovním režimu [7]*

**c) hybridní FVE**

Hybridní FVE jak už název napovídá, jsou kombinací předchozích dvou variant. Je možné fungovat jako samostatná jednotka, tedy s odpojením od DS a vyrobená energie se spotřebovává a slouží k dobíjení akumulátoru. To samé pokud dojde k výpadku DS, FVE se odepne a pracuje dále. Pokud je dlouhodobě nízký svit slunce, napájí se z DS. Princip této konfigurace ukazuje *Obr. 3.3*.



*Obr. 3.3 Schéma hybridní FVE [7]*

## 3.2 Podmínky připojitelnosti do DS

Tato kapitola je zpracována na základě informací z literatury vydanou provozovateli distribučních soustav PPDS: Příloha 4 Pravidla pro paralelní provoz zdrojů se sítí provozovatele distribuční soustavy [8].

U nově připojovaných zdrojů do DS je nutná možnost instalace dálkového ovládní. Hodnoty výkonu pro splnění požadavku na spínací místo s oddělovací funkcí jsou u jednofázových zdrojů do 4,6 kVA a u trojfázových zdrojů do 30 kVA, pokud jsou zdroje opatřeny zařízením pro sledování stavů sítě spolu se spínacím prvkem, který může být součástí střídače (například fotovoltaická elektrárna). Principů sledování stavu sítě může být několik. Sledovat stav sítě lze například sledováním impedance, měření fázových napětí nebo hlídat změny fázoru napětí. Toto je platné pro výroby, u kterých není možný provoz v ostrovním režimu. Pokud výroba umožňuje ostrovní provoz, je nutné, že pokud dojde k výpadku napětí v DS musí se výroba automaticky odpojit. Pokud má zdroj výkon více než 100 kVA včetně, musí být spínače s oddělovací funkcí vybaven dálkovým ovládním a musí umět signalizovat stav. Výroby je nutné připojovat do DS ve vhodných předávacích místech.

Provozovatel distribuční soustavy (PDS) určuje způsob a místo připojení, napěťovou hladinu, do které výroba bude připojena a velikost rezervovaného výkonu. Vše je voleno s ohledem na síťové poměry, požadovaný výkon a způsob provozu zdroje. Těmito pravidly by měl být zajištěn provoz výroby bez rušivých účinků a nebude ohroženo napájení v síti nebo dodávky od ostatních výrobců.

Možnost připojení nového zdroje vychází z posouzení zpětných vlivů na síť vycházející z impedance sítě ve společném napájecím bodě nebo zkratového výkonu, připojovaného výkonu, typu a způsobu provozu výroby a údajích o souvisejících výrobnách včetně jejich vlivu na napětí v DS.

### Zvýšené napětí

Zvýšené napětí nesmí překročit v nejnepříznivějším případě dané hodnoty, které se liší pro NN sítě a VN a 110kV sítě.

Pro VN a 110kV platí:

$$\Delta U_{VN,110} \leq 2\%$$

Pro NN platí:

$$\Delta U_{NN} \leq 3\%$$

Napěťová úroveň musí být posouzena s ohledem na velikost skutečného napětí

v předávacím místě.

Pokud je v síti NN či VN jedno přípojně místo, lze podmínku zjednodušit pomocí zkratových poměrů výkonu  $k_{k1}$ .

$$k_{k1} = \frac{S_{kV}}{\sum S_{A \max}} (-) \quad (3.1)$$

$S_{kV}$  zkratový výkon v přípojném bodě

$\sum S_{A \max}$  maximální zdánlivý výkon všech připojených zdrojů (včetně těch plánovaných)

Podmínka pro zvýšené napětí bude platit vždy, když poměr zkratových výkonů:

$$k_{k1vn} \geq 50$$

$$k_{k1nn} \geq 33$$

Pro silně induktivní síť:

$$S_{A \max vn} \leq \frac{2\% \cdot S_{kV}}{|\cos(\varphi_{kV} - \varphi)|} = \frac{S_{kV}}{50 \cdot |\cos(\varphi_{kV} - \varphi)|} \quad (3.2)$$

$$S_{A \max nn} \leq \frac{3\% \cdot S_{kV}}{|\cos(\varphi_{kV} - \varphi)|} = \frac{S_{kV}}{33 \cdot |\cos(\varphi_{kV} - \varphi)|} \quad (3.3)$$

$\varphi_{kV}$  fázový úhel impedance sítě

$\varphi$  fázový úhel mezi napětím a proudem zdroje při maximálním zdánlivém výkonu  $S_{A \max}$

V praxi většinou známe  $S_{A \max}$  a z něho následně dopočítáme zvýšení napětí v přípojném místě dle vztahu:

$$\Delta U_{AV} \leq \frac{S_{A \max} \cdot |\cos(\varphi_{kV} - \varphi)|}{S_{kV}} \quad (3.4)$$

### Harmonické proudy

Harmonické proudy jsou způsobeny především střídači či měniči kmitočtu. Právě střídače můžeme nalézt u fotovoltaik, a proto je nutné na ně brát zřetel.

#### Zdroje v síti NN

Pokud jsou u zdroje splněny podmínky produkování harmonických dle normy ČSN EN 61000-3-12 (35 1720), pak je považována vliv emise harmonických na DS za přípustnou. Ovšem není-li podmínka dle normy splněna, je ještě možné bez dalších opatření použít jednoduché kritérium pro posouzení připojitelnosti, které je uvedeno níže.

Přípustný proud  $I_v$ :

$$I_v = i_v \cdot \frac{S_{kV}}{\sin \psi_{kV}} (A) \quad (3.5)$$

$i_v$  vztažný proud dán tabulkou

$$\sin \psi_{kV} = \frac{X_k}{Z_k} (-) \quad (3.6)$$

( $\approx 1$  pokud předávací místo blízko transformátoru VN/NN)

Tento způsob platí pro výpočet u NN sítě.

#### Zdroje v síti VN

Pokud je v síti jen jedno předávací místo, tak přípustné harmonické proudy:

$$I_{v1} = i_{vpř} \cdot S_{kV} (A) \quad (3.7)$$

$i_{vpř}$  vztažný proud dán tabulkou

Pokud je ve společném napájecím bodě zapojeno více zařízení pak:

$$I_{v2} = I_{v1} \cdot \frac{S_A}{S_{AV}} = i_{vpř} \cdot S_{kV} \cdot \frac{S_A}{S_{AV}} (A) \quad (3.8)$$

$S_A$  zdánlivý výkon zdroje

$S_{AV}$  celkový zdánlivý výkon připojených (plánovaných) zdrojů ve společném napájecím bodě

Pravidla sčítání harmonických proudů od různých odběratelů a zdrojů.

- usměrňovače řízené sítí (6-ti a 12-ti pulzní)

Typické harmonické (5., 7., 11., 13., atd.) a netypické  $v < 7$  se sčítají aritmeticky.

$$I_v = \sum_{i=1}^n I_{v i} (A) \quad (3.9)$$

Netypické harmonické  $v > 7$  je celkový harmonický proud daného řádu.

$$I_v = \sqrt{\sum_{i=1}^n I_{v i}^2} (A) \quad (3.10)$$

- pulzně modulované střídače

Pro řád  $\mu$ , který je celočíselný od 11. řádu jinak neceločíselný, je celkový proud dán vztahem.

$$I_\mu = \sqrt{\sum_{i=1}^n I_{\mu i}^2} (A) \quad (3.11)$$

Případné vyskytující se netypické harmonické řádu  $\mu < 11$  se sčítají aritmeticky.

Dojde-li k překročení přípustný proudů je nutné podrobnější posouzení.



### Zdroje v síti 110kV

Povolené proudy harmonických do 13. řádu:

$$I_{v\ zul} = i_{v,\mu\ zul} \cdot S_{kV} \cdot \frac{S_A}{S_0} \quad (A) \quad (3.12)$$

Pro vyšší harmonické a meziharmonické:

$$I_{v,\mu\ zul} = i_{v,\mu\ zul} \cdot S_{kV} \cdot \sqrt{\frac{S_A}{S_0}} \quad (A) \quad (3.13)$$

$I_{v,\mu\ zul}$	přípustný proud harmonických zdroje
$i_{v,\mu\ zul}$	přípustný vztažný proud dle tabulky
$S_{kV}$	zkratový výkon v přípojném místě
$S_A$	přípojný výkon zdroje
$S_0$	referenční výkon (mezní tepelný výkon v úseku mezi 2 transformátory nebo maximální připojitelný výkon zdroje do transformovny)

Harmonické a meziharmonické vyšší než 13. řádu lze zanedbat, pokud je největší výkon měniče menší než 1/100 zkratového výkonu v přípojném místě.

### Ovlivnění HDO

Bez posouzení vlivu na zařízení HDO je možné do sítě NN připojit FVE do celkového výkonu 20kVA v přípojném místě a 40kVA v síťové oblasti (uzlu). Na hladině VN a 110kV jsou to hodnoty stejné jako pro ostatní zdroje tj. na VN 500kVA a 1MVA a na hladině 110kV 5MVA a 10MVA.

### **Kompensace účinníku**

U FVE se na hladině NN do výkonu 4,6kVA na fázi kompenzace účinníku nepožaduje.

U zdrojů na hladině VN a 110kV musí být jalový výkon plně říditelný od hodnoty výkonu 100kVA.

### **Připojování zdrojů se střídači popř. měniči kmitočtu**

U zdrojů se střídači (FVE) platí podmínka, že mohou být spínány pouze tehdy, je-li střídavá strana bez napětí. Pokud není možný ostrovní režim provozu, platí pro tyto zdroje stejné podmínky jako u synchronních generátorů.

- rozdíl napětí  $\Delta U < \pm 10\% U_n$
- rozdíl frekvence  $\Delta f < \pm 0,5Hz$

- rozdíl fáze  $\vartheta < \pm 10^\circ$

### **Zvláštní požadavky na zdroje OZE s výkonem nad 15MW a zapojených do sítě 110kV**

Cílem těchto požadavků je, aby i tyto zdroje napomáhaly síti při krizových situacích. Cílem je tedy zamezit výpadku zdroje při poklesu napětí a pomoci daným způsobem síti jako tomu je u klasických synchronních generátorů. Dále se požaduje schopnost reagovat na zvýšení frekvence snížením dodávaného činného výkonu.

Pro podrobnější informace o dané problematice je nutné nahlédnout do PPDS Příloha 4: Pravidla pro paralelní provoz zdrojů se sítí provozovatele distribuční soustavy.

### **Nové požadavky na výrobní podle PNE 33 3430-8-1 z roku 2015**

- a) ochrany výrobní jednotky včetně těch, týkajících se primárního pohonu, jsou-li technicky odůvodněné a odsouhlasené výrobcem i PDS
- b) ochrana rozhraní a ochrany před vnitřními poruchami výrobní
- c) povely dálkového ovládání regulace činného výkonu
- d) místní reakce na nadfrekvenci
- e) povely dálkového ovládání (zadané hodnoty nebo režimy řízení P a/nebo Q)
- f) místní ovládání jalového výkonu a/nebo činného výkonu

Výrobní musí splňovat požadavky PDS a kromě jiného musí zajistit i následující:

- a) synchronizaci, provoz a odpojení za normálních provozních podmínek, tj. ve stavu bez poruch a selhání
- b) poruchy a selhání uvnitř výrobní nesmí narušit normální chod distribuční sítě
- c) koordinovaný provoz spínače rozhraní se spínačem zdroje, hlavním spínačem a spínačem DS při poruchách nebo selháních uvnitř výrobní nebo sítě PDS během paralelního provozu s DS
- d) odpojení výrobní od DS vypnutím spínače rozhraní

Výrobní musí být schopna nepřerušného provozu, pokud se frekvence pohybuje v bodě připojení mezi 49 - 51Hz. Pokud dojde k poklesu frekvence, musí výrobní být schopna dodávat maximální výkon s co nejmenším omezením. S ohledem na napětí musí být výrobní schopna trvalého provozu, pokud je napětí v místě připojení v rozmezí 85%U<sub>N</sub> až 110%U<sub>N</sub> (90%U<sub>N</sub> až 110%U<sub>N</sub> pro VN). V případě nižšího napětí je povoleno snížení zdánlivého výkonu pro zachování proudové meze výrobní. Výrobní musí být odolná proti rušení.

Výrobna musí být odolná proti rychlým změnám frekvence tj. musí být schopna provozu pokud rychlost změny frekvence nepřesáhne 2,5Hz/s. Výrobna musí být schopna překlenout krátkodobý pokles napětí a zůstat připojená k DS. V okamžiku návratu napětí do provozního rozsahu musí být 90% výkonu obnoveno do 5 sekund. Pokud dojde ke krátkodobému přepětí, musí zůstat výrobna připojená 100ms při překročení  $120\%U_N$  a 1 sekundu při překročení  $115\%U_N$ .

Výrobna musí být schopna aktivní odezvy činného výkonu na frekvenci, a to v rozmezí 50,2Hz - 50,5Hz u nadfrekvence. V případě VN také reakce na podfrekvenci 49,8Hz - 49,5Hz. U FVE se předpokládá regulace výkonu v celém rozsahu poklesu.

Výrobna také musí být schopná reagovat na změny napětí. Řízení napětí může být řešeno několika způsoby uvedenými níže.

- Q konstantní
- Q (U)
- Q (P)
- Cos  $\varphi$  konstantní
- Cos  $\varphi$  (U)
- Cos  $\varphi$  (P)

U fotovoltaických výroben NN se používá řízení s konstantním účínkem.

Fotovoltaická výrobna musí být schopna režimu nulového proudu. Pokud je napětí mimo statický napěťový rozsah musí být možnost omezit proud na nebo méně než 10% jmenovitého proudu, co nejrychleji. Rozsah statického napětí musí být nastavitelná u hranice podpětí -20% až  $0\%U_N$  a u hranice přepětí -20 až  $0\%U_N$ .

Výrobny musí splňovat stejně jako ostatní zařízení elektromagnetickou kompatibilitu.

Podrobné informace o požadavcích jsou uvedeny v podnikové normě, z které bylo čerpáno, PNE 33 3430-8-1 Požadavky pro připojení generátorů nad 16A na fázi do distribučních sítí - Část 8-1: Sítě NN z roku 2015[19] a Požadavky pro připojení do distribučních sítí - Část 8-2: Sítě VN z roku 2015[20].

## 4. Jištění FVE

### 4.1 Názvosloví

V oblasti fotovoltaiky se používá mnoho pojmů, které často označují jedno, a to samé. V této kapitole budou objasněny tyto pojmy a sjednoceny pro přehlednost v následujícím textu.

Fotovoltaický článek se označuje také PV článek (z anglického "photovoltaic" - PV) dále v textu bude používán pojem PV článek.

Fotovoltaický panel je možné také nazývat modul. Dále bude používán PV panel.

Sériovým řazením vznikají řetězce nebo také stringy či větve. V textu budeme používat název řetězec.

Dalším větším celkem je skupina nebo také část pole. V textu budeme používat pojem skupina.

Poslední kompletní celek se nazývá pole, které je již zapojeno do měniče, který lze nazývat také střídač, bude používán pojem měnič.

Toto názvosloví, které bude používáno v následujícím textu, je shrnuto a znázorněno na *Obr. 4.1*.

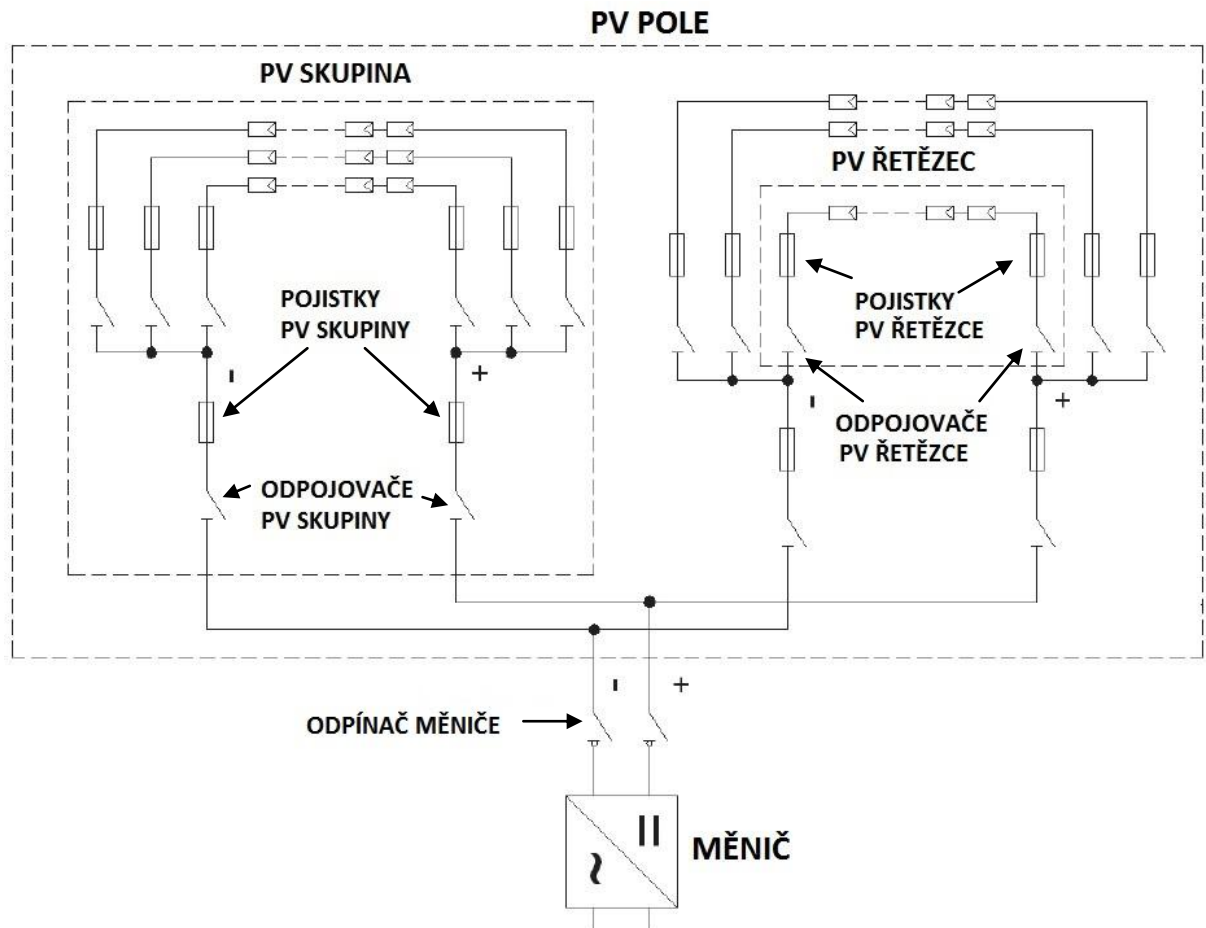
### 4.2 Způsoby jištění stejnosměrných rozvodů

Tato kapitola je zpracována na základě informací ze zdrojů [9] a [10].

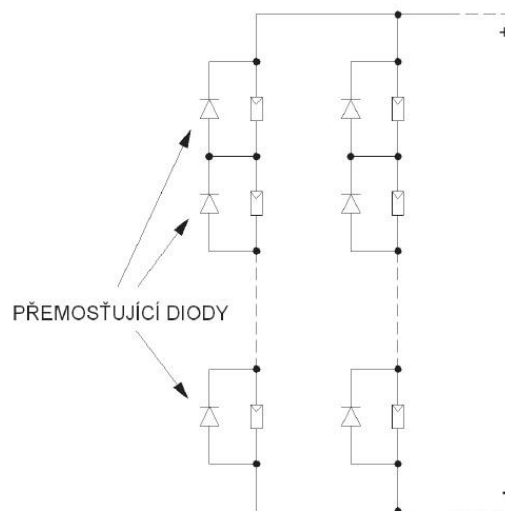
Jištění stejnosměrných (dále DC) rozvodů je velmi důležitá část ve fotovoltaice (dále PV z anglického "photovoltaic"). Ochrana ve PV začíná už od samotných článků, vede přes ochranu řetězců, dále ochranu skupin až po celkovou ochranu PV pole před měničem. Schéma kompletního jištění je vidět na *Obr. 4.1*.

Chránit PV články je nutné hlavně kvůli klimatickým jevům. Klimatickými jevy je myšlen například mrak, který zastínuje část panelu nebo sníh, který leží na části panelu. Další možný druh zastínění může působit stín od cizích předmětů.

V normálním provozu pracují PV články jako zdroje, dojde-li však k jejich zastínění stanou se pro celý řetězec zátěží. Vznikají na těchto článcích vyšší ztráty a jimi i úměrné oteplení, které může dosáhnout takových hodnot, že může dojít až k zničení článků. Chránit články nelze jisticími přístroji, protože proud, který jimi prochází, není vyšší než zkratový. K ochraně před tímto poruchovým stavem se tedy používá diod v tzv. zapojení bypass *Obr. 4.2*. V tomto zapojení diody přemostují článek, a tak ho chrání před zničením.



Obr. 4.1 Princip jištění fotovoltaického zdroje [10]



Obr. 4.2 Schéma zapojení diod k PV článkům (by-pass) [10]

Z PV článků se skládá panel. Z VA charakteristiky na Obr. 2.4 je patrné, že zkratový proud panelu (článku) je jen nepatrně vyšší než proud  $I_{MPP}$ , ve kterém panel (článek) pracuje. To znamená, že panel je prakticky "zkratuvzdorný". Dojde-li na panelu ke zkratu, nedojde

k jeho poškození. Tímto odpadá jištění panelu.

Při výběru pojistek, jisticích a dalších elektrických zařízení má vliv několik vlastností PV modulu. Z Obr. 2.6 vidíme velkou závislost velikosti proudu na intenzitě ozáření, to je nutné brát na vědomí při volbě minimální hodnoty jmenovitého proudu. Počítat musíme také se snížením napětí panelu, vzhledem k vyšší teplotě než je za standardních zkušebních podmínek. Naopak nižší teplota znamená vyšší napětí, a to je potřeba vzít v potaz při volbě jmenovitého napětí jisticích prvků a dalších zařízení.

PV řetězce je už nutné chránit. Oproti AC obvodům je to poměrně složité. Specifikem je například nutnost chránit oba póly, kladný i záporný. Dále nemůžeme použít běžné pojistky jako u AC obvodů, ale pojistky určené přímo pro FVZ dané normou. PV řetězce se zpravidla chrání válcovými pojistkami 10x38mm, skupiny a pole nožovými pojistkami NH. Systém chránění řetězců, skupin a polí je popsán níže.

### Ochrana proti zpětnému proudu

Poruchou, při které vzniká zpětný proud, může být např. vnitřní zkrat na PV panelu nebo zkrat na vývodních kabelech vlivem poškození izolace.

Vypadne-li jeden panel v řetězci, sníží se napětí na daném řetězci a v důsledku toho dojde k poklesu napětí i na ostatních řetězcích. Řetězec s poškozeným panelem je pro ostatní přítěží a teče přes něj proud v obráceném směru tzv. zpětný proud  $I_R$ . Zdravé panely tak pracují v režimu I. kvadrantu ve VA charakteristice. Velikost zpětného proudu je stanovena přibližně vztahem:

$$I_R \approx (n - 1) \cdot I_k \quad (4.1)$$

$I_R$	zpětný proud
$n$	počet paralelní spojených řetězců
$I_k$	zkratový proud modulu

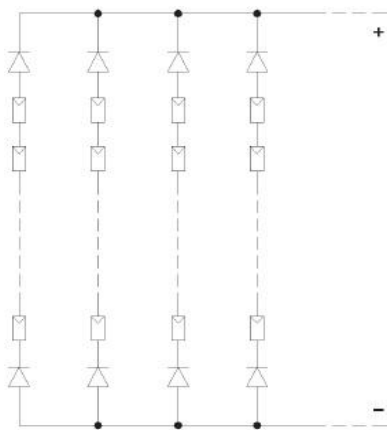
Zpětný proud je nebezpečný pro zbývající nezkratované panely, protože je může svými tepelnými účinky zničit. FVE je většinou provozována jako izolovaná, a to má za následek nebezpečí dvojitých zemních spojení, které přejdou ve zkrat, a poté jsou některé panely řetězce namáhány proudem  $I_R$ .

PV panely snesou zpětný proud jen do určité velikosti. Udává se tedy u nich hodnota  $I_{MOD\_REVERSE}$ , který u monokrystalických a polykrystalických je přibližně  $2-3I_k$ . Dle normy ČSN EN 61730-2 musí být PV panely schopny vydržet  $1,35I_{MOD\_REVERSE}$  po dvě hodiny. Po překročení této hodnoty může dojít ke zničení panelu. Proud  $I_{MOD\_REVERSE}$  slouží

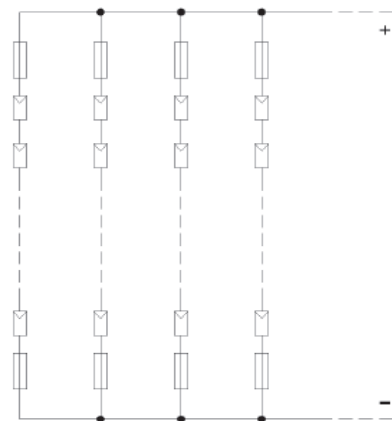
pro určení maximálního jmenovitého proudu pojistky, avšak někteří výrobci uvádí přímo maximální hodnotu jmenovitého proudu pro jištění PV panelů proti zpětnému proudu. Ochrana proti přetížení nemusí být použita, pokud nejsou ve skupině spojeny více než tři paralelní řetězce, a to z toho důvodu, že  $I_{MOD\_REVERSE}$  je minimálně dvojnásobek  $I_k$ .

Ochrana před zpětným proudem způsobeným zkratem či dvojitým zemním spojením lze provést dvěma způsoby.

Prvním způsobem je zapojení diod v závěrném směru proti zpětnému proudu. Za předpokladu, že DC síť bude izolovaná IT, musí být diody umístěny z obou stran, jak je znázorněno na *Obr 4.3*.



*Obr.4.3: Ochrana řetězců proti zpětnému proudu pomocí diod [10]*



*Obr.4.4: Ochrana řetězců proti zpětnému proudu pomocí pojistek [10]*

Druhým způsobem je ochrana pojistkami nebo jističi. Ovšem jističe na velká DC napětí jsou drahý a velký, a proto se nepoužívají.

U FVE nelze použít běžný typ pojistkových vložek, ale takové, které mají vypínací schopnost i pro poměrně malé proudy. Požadavkům vyhovují charakteristiky gG, gS, gR a speciální pojistky pro PV gPv. Smluvený krajní proud je  $I_{nf} = 1,13I_N$  a tavný proud  $I_f = 1,45I_N$ . Krajní i tavný proud jsou nižší než u ostatních druhů charakteristik. To je výhodou pro lepší přiřazení k PV modulům a mají lepší vlastnosti při opakovaném zatěžování. Stejně jako v případě použití diod i zde platí, že pokud je síť izolovaná je nutné použít pojistky z obou stran viz *Obr. 4.4*.

Podmínka pro jmenovité napětí pojistkových vložek pro ochranu panelu v řetězci, platná také pro jištění v ostatních částech DC strany např. PV skupiny.

$$U_{Np} \geq 1,2 \cdot U_0 \cdot m \tag{4.2}$$

$U_{Np}$  jmenovité napětí pojistky

$U_0$  napětí naprázdno panelu za standardních zkušebních podmínek

$m$  počet sériově zapojených panelů

Koeficient 1,2 zahrnuje zvýšené napětí panelu při teplotě  $-25^{\circ}\text{C}$  a výrobní toleranci.

Nárok na jmenovitý proud pojistky je takový, aby zajistil spolehlivý chod za každých okolností v bezporuchovém stavu, ale zároveň spolehlivě ochránil panely.

Podmínka pro minimální jmenovitý proud:

$$I_{Np} \geq 1,4 \cdot I_k \quad (4.3)$$

$I_{Np}$  jmenovitý proud pojistky

$I_k$  zkratový proud PV panelu za standardních zkušebních podmínek

Koeficient 1,4 respektuje cyklické zatížení, teplotu okolí  $60^{\circ}\text{C}$  a zvýšené ozáření  $1200\text{W}/\text{m}^2$ . Hodnota 1,4 je platná pro naše podnebné pásmo a charakteristiky gR a gPv. Pro gG a gS je možné volit nižší hodnoty. Obecně se koeficient může pochybovat mezi 1,25 až 1,6.

Podmínka pro ochranu panelu před tepelnými účinky zpětného proudu:

$$I_f \leq 1,35 \cdot I_{MOD\_REVERSE} \quad (4.4)$$

Pro pojistky gPv:

$$1,45 \cdot I_N \leq 1,35 \cdot I_{MOD\_REVERSE} \quad (4.5)$$

Z toho vychází podmínka pro maximální jmenovitý proud pojistkové vložky:

$$I_N \leq 0,9 \cdot I_{MOD\_REVERSE} \quad (4.6)$$

Stejný postup lze aplikovat i pro ostatní charakteristiky.

Po sloučení podmínek pro minimální a maximální jmenovitý proud dostáváme.

a) pojistková vložka charakteristiky gPv

$$1,4 \cdot I_k \leq I_N \leq 0,9 \cdot I_{MOD\_REVERSE} \quad (4.7)$$

b) pojistková vložka charakteristiky gG, gS a gR pro  $I_N \geq 16\text{A}$

$$1,4 \cdot I_k \leq I_N \leq 0,85 \cdot I_{MOD\_REVERSE} \quad (4.8)$$

c) pojistková vložka charakteristiky gG, gS a gR pro  $I_N < 16\text{A}$

$$1,4 \cdot I_k \leq I_N \leq 0,7 \cdot I_{MOD\_REVERSE} \quad (4.9)$$

Při volbě způsobu ochrany proti zpětnému proudu se volí spíše pojistky, a to z těchto důvodů.

1) Pokud dojde k průrazu diody, přestane být panel chráněn naopak od pojistky, která pokud se přetaví, odpojí se obvod.

2) Na pojistkách vzniká o polovinu méně ztrát oproti diodám.

Válcové pojistky je vhodné použít spolu s odpojovači, které umožňují bezpečnou výměnu



pojistek, a také odpojení celého řetězce.



Obr.4.5: Válcová pojistka PF10 (gR) a odpojovač pro válcové pojistky OPF10-1 [10]

### Jištění vedení proti přetížení

Chráněná proti přetížení musí být vedení, která propojují jednotlivé panely v řetězci, dále vedení propojující paralelně řetězce do skupin a v neposlední řadě paralelně propojené skupiny tvořící pole. Vedení spojující panely v řetězci a paralelně spojující řetězce do skupin jsou chráněny pojistkami řetězců, které chrání řetězec i před zpětnými proudy a podmínky pro ně jsou uvedeny v předchozí části kapitoly. Podmínky pro dovolený zatěžovací proud v řetězci  $I_{Z\_ŘETĚZEC}$  jsou dány takto:

- a) pojistková vložka charakteristiky gPv

$$I_N \leq I_{Z\_ŘETĚZEC} \quad (4.10)$$

- b) pojistková vložka charakteristiky gG, gS a gR pro  $I_N \geq 16A$

$$I_N \leq 0,9 \cdot I_{Z\_ŘETĚZEC} \quad (4.11)$$

- c) pojistková vložka charakteristiky gG, gS a gR pro  $I_N < 16A$

$$I_N \leq 0,75 \cdot I_{Z\_ŘETĚZEC} \quad (4.12)$$

Podmínka pro dovolený zatěžovací proud a jmenovitý proud pojistek pro ochranu vedení, které paralelně spojují skupiny nebo pole zní.

- a) pojistková vložka charakteristiky gPv

$$1,4 \cdot I_{k\_SKUPINA(POLE)} \leq I_N \leq I_{Z\_SKUPINA(POLE)} \quad (4.13)$$

- b) pojistková vložka charakteristiky gG, gS a gR pro  $I_N \geq 16A$

$$1,4 \cdot I_{k\_SKUPINA(POLE)} \leq I_N \leq 0,9 \cdot I_{Z\_SKUPINA(POLE)} \quad (4.14)$$

$I_{Z\_ŘETĚZEC}$	dovolený zatěžovací proud vedení řetězce
$I_{Z\_SKUPINA(POLE)}$	dovolený zatěžovací proud vedení spojující skupiny (pole)
$I_{k\_SKUPINA(POLE)}$	zkratový proud skupiny (pole)

Zkratový proud skupiny:

$$I_{k\_SKUPINA} = n_s \cdot I_k (A) \quad (4.15)$$

Zkratový proud pole:

$$I_{k\_POLE} = n_p \cdot I_{k\_SKUPINA} (A) \quad (4.16)$$

$I_k$	zkratový proud panelu
$n_s$	počet paralelně spojených řetězců ve skupině
$n_p$	počet paralelně spojených skupin v poli

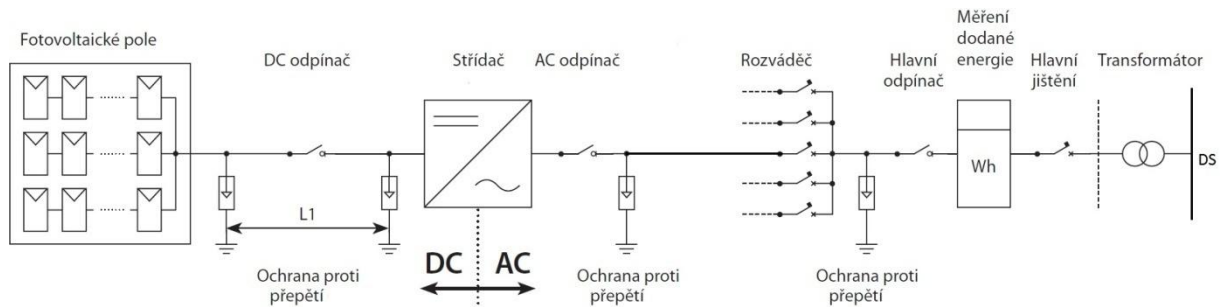
Je-li dovolený zatěžovací proud roven nebo větší než 1,25 násobek zkratového proudu  $I_k$  v každém místě, není pak nutné použít ochranu proti přetížení u vedení řetězců, skupin a polí

### 4.3 Jištění a volba průřezu vedení

Norma, ČSN 33 2000-7-712 Zařízení jednoúčelová a ve zvláštních objektech - Solární fotovoltaické napájecí systémy, udává řešení ochrany vedení propojujícího PV zdroj s DS proti nadproudům a prezentuje výběr jisticích a odpojovacích prvků. V normě je řešena střídavá strana a spolu s tím norma udává nutnost automatického odpojení od sítě v případě poruchy.

Normou je dáno, že DS je zdroj a FVE je zátěž. Zkratový proud PV zdroje se liší od jmenovitého velmi málo, tudíž není možné použít ochranu automatického odpojení jisticím přístrojem. V případě, že není DC strana oddělená od AC strany, je nutné, aby byl na výstupu střídače použit proudový chránič typu B, který reaguje i na nezvládnutý DC proud. Důvodem je zabránění možnosti, že by se na AC stranu dostalo DC napětí. Příkladem oddělení může být střídač s transformátorem.

DS je tvrdý zdroj a z tohoto důvodu je nutné z její strany chránit proti nadproudům propojovací vedení a el. zařízení sloužící například k měření či spínání. Ochranu lze zajistit buďto jisticím přístrojem před elektroměrem v místě připojení PV zdroje k DS (hlavní jištění) nebo AC odpínačem v místě připojení PV zdroje na AC straně měniče (*Obr. 4.6*). Tyto jističe chrání proti zkratu a zajišťují také automatické odpojení od DS v případě poruchy.



Obr. 4.6: Schéma propojení PV zdroje s DS včetně znázornění ochran [12]

### Jištění vedení

Základní podmínka pro koordinaci mezi vodiči a jistíci prvky, která musí platit, zní podle vztahu 4.17.

$$I_p \leq I_{Np} \leq I_{dov} \tag{4.17}$$

- $I_p$  výpočtový proud
- $I_{Np}$  jmenovitý proud pojistky nebo jističe
- $I_{dov}$  dovolené proudové zatížení vedení

Volba jističe pro ochranu vedení je podobná stejně jako u řešení vhodné pojistky u ochrany DC strany. Základní podmínka pro první bod přetěžovací charakteristiky jističe je uvedena vztahem 4.18. Vztah je platný pouze pro kabely s PVC izolací, kde maximální teplota provozu je 70°C a maximální teplota při přetížení je 120°C. Dále je uvažována teplota okolního vzduchu 30°C v případě uložení v zemi teplota země 20°C. Ovšem jsou také výjimky, pro které koeficient 1,45 také neplatí a je nutné ho přepočítat podle vztahu 4.21. Smluvený tavný proud pojistek je  $1,6 \cdot I_{Np}$  a pro jističe Modeion a Arion  $1,3 \cdot I_{Np}$ .

$$I_2 \leq 1,45 \cdot I_{dov} \tag{4.18}$$

$$\text{Pojistka: } I_2 = 1,6 \cdot I_{Np} \leq 1,45 \cdot I_{dov} \rightarrow I_{Np} \leq 0,9 \cdot I_{dov} \tag{4.19}$$

$$\text{Jistič: } I_2 = 1,3 \cdot I_{Np} \leq 1,45 \cdot I_{dov} \rightarrow I_{Np} \leq 1,12 \cdot I_{dov} \tag{4.20}$$

Násobný koeficient lze vypočítat ze vztahu 4.21:

$$\frac{I_2}{I_{dov}} = \sqrt{\frac{\Delta\vartheta_p}{\Delta\vartheta_z}} = \sqrt{\frac{\vartheta_p - \vartheta_o}{\vartheta_z - \vartheta_o}} \tag{4.21}$$

- $\Delta\vartheta_p$  maximální teplota při přetížení
- $\Delta\vartheta_z$  maximální teplota při trvalém provozu
- $\Delta\vartheta_o$  teplota okolí

Druhá podmínka při volbě jistíciho prvku vychází z první.

$$I_{Np} \leq K_p \cdot I_{dov} \tag{4.22}$$

$K_p$  pro pojistku má hodnotu 0,9 viz 4.19 a pro jističe se obecně bere 1 i přes to, že dle vztahu 4.20 je 1,12 (musí platit podmínka 4.17)

### Dimenzování vodičů

Dimenzování vedení vychází ze spousty požadavků. Vedení je nutné dimenzovat na proudovou zatížitelnost, mechanické namáhání, úbytek napětí, minimální průřez vedení s ohledem na oteplení zkratovými proudy a ekonomický návrh vedení s ohledem na minimalizaci ztrát.

#### a) Dovolená proudová zatížitelnost

Dovolená proudová zatížitelnost souvisí s oteplením vodiče. Ustálený stav nastane přibližně za 3-5 $\tau$ , kde  $\tau$  je doba, po kterou by došlo k ustálenému stavu, pokud by oteplení probíhalo lineárně. Proud protékající vodičem lze určit podle vztahu 4.23.

$$I_p = \frac{S_p}{\sqrt{3} \cdot U_N} = \frac{\beta \cdot P_i}{\sqrt{3} \cdot U_N \cdot \cos \varphi_N} (A) \quad (4.23)$$

Vztah pro určení dovoleného proudu vodičem:

$$I_{dov} = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot I_N (A) \quad (4.24)$$

$I_{dov}$  je takový proud, kdy teplota vodiče nepřesáhne dovolenou pracovní teplotu při reálných podmínkách.

$I_N$  je takový proud, kdy teplota vodiče nepřesáhne dovolenou pracovní teplotu při základních (normovaných) podmínkách.

Korekční koeficienty  $k_1$ ,  $k_2$  a  $k_3$  respektují skutečné podmínky, kde se vodič nachází.

#### Základní normované podmínky

##### 1) uložení vzduch

- samostatný vodič
- horizontální poloha
- teplota okolí 30°C

##### 2) uložení zem

- samostatný vodič
- horizontální poloha
- teplota země 20°C
- 70cm pod zemí
- teplotní odpor země 0,7 Km/W

$k_1$  - respektuje teplotu okolí

$k_2$  - respektuje uložení vodiče

$k_3$  - respektuje způsob zatěžování (krátkodobé, trvalé) - při našich výpočtech zanedbáme

Výsledná podmínka:

$$\frac{I_p}{k_1 \cdot k_2 \cdot k_3} \leq I_N \quad (4.25)$$

Proud protékající vodičem přepočítaný přes korekční koeficienty musí být menší než dovolený proud vodiče.

### b) Mechanické namáhání

S ohledem na mechanické namáhání jsou dány minimální průřezy pro dané určení vodiče.

### c) Dovolенý úbytek napětí na vodiči

Úbytek napětí na vodiči dán vztahem 4.26 a procentuální úbytek vztahem 4.27.

$$\Delta U_f = R_k \cdot l \cdot I_p \cdot \cos \varphi_p + X_k \cdot l \cdot I_p \cdot \sin \varphi_p \quad (V) \quad (4.26)$$

$$\Delta U_{\%} = \frac{\sqrt{3} \cdot \Delta U_f}{U_N} \cdot 100 \quad (\%) \quad (4.27)$$

Hodnoty odporu  $R_k$  a reaktance  $X_k$  jsou uvedeny výrobcem nebo je nalezneme v tabulkách.

### d) Kontrola na oteplení zkratovými proudy

Průřez vodiče musí být vyšší než minimální průřez, který nám vyjde, viz vztah 4.32. Výpočet minimálního průřezu je znázorněn vztahem 4.31.

$$I_{th} = k_e \cdot I_k'' = \sqrt{m+n} \cdot I_k'' \quad (A) \quad (4.28)$$

$$m = \frac{1}{2 \cdot f \cdot t_k \cdot \ln(\kappa - 1)} \cdot [e^{4 \cdot f \cdot t_k \cdot \ln(\kappa - 1)} - 1] \quad (-) \quad (4.29)$$

$$\kappa = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \cdot \frac{R}{X}} \quad (-) \quad (4.30)$$

$$S_{MIN} = \frac{I_{th} \cdot \sqrt{t_k}}{K} \quad (mm^2) \quad (4.31)$$

$$S \geq S_{MIN} \quad (4.32)$$

Pro zkraty  $t_k > 0,5s$  a vzdálené zkraty lze uvažovat koeficient  $k_e = 1$ .

Pro přesné určení hodnoty koeficientu  $k_e$  slouží součinitelé pro tepelné účinky střídavé a stejnosměrné složky zkratového proudu  $n$  a  $m$ . Součinitel  $n = 1$  a součinitel  $m$  je dán vztahem 4.29. Součinitel  $\kappa$  je součinitel pro výpočet nárazového zkratového proudu  $i_p$  a je určena

vztahem 4.30.

Konstanta  $K$  je materiálová konstanta, která respektuje materiál jádra a materiál izolace.

#### e) Průřez vedení z ekonomického hlediska

Z podmínek dimenzování vedení vychází minimální průřez. Cena kabelu je úměrná velikosti průřezu, a proto při snaze šetřit můžeme sáhnout právě po minimálním průřezu, který nám vyšel dle podmínek dimenzování. Ovšem při výběru správného průřezu z ekonomického hlediska není důležitá jen pořizovací cena, ale také provozní náklady.

Metoda, kterou se stanovuje hospodárný průřez, se nazývá ekonomická optimalizace průřezu.

Normy, které se zabývají řešením hospodárného průřezu, jsou ČSN 341610 Elektrický silnoproudý rozvod v průmyslových provozovnách a ČSN IEC 387-3-2 Ekonomická optimalizace průřezu silových kabelů.

#### Ilustrativní způsob výpočtu

- Požizovací (investiční) náklady

Předpoklady:

- stejný typ kabelu
- stejný způsob uložení (uvažujeme pouze cenu kabelu nikoliv i náklady na jeho uložení)

$$N_i = C_k \cdot S \cdot l \text{ (Kč)} \quad (4.33)$$

$N_i$  pořizovací náklady na vedení (kabel)

$C_k$  cena 1m kabelu vztažená na  $1\text{mm}^2$  průřezu fázového vodiče (Kč/m  $\text{mm}^2$ )

$S$  průřez jedné fáze vedení ( $\text{mm}^2$ )

$l$  délka vedení (m)

- Provozní náklady

Provozní náklady v prvním roce:

$$N_{p1} = 3 \cdot 0,001 \cdot \rho_{45} \cdot \frac{l}{S} \cdot I_p^2 \cdot T \cdot C_{kWh} \text{ (Kč)} \quad (4.34)$$

$N_{p1}$  provozní náklady v prvním roce

$\rho_{45}$  měrný elektrický odpor při teplotě  $45^\circ\text{C}$  ( $\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ )

$I_p$  výpočtový proud tekoucí vedením v prvním roce (A)

T	doba plných ztrát za rok (hod/rok)
C <sub>kWh</sub>	cena 1 kWh elektrické energie (Kč/kWh)

Doba plných ztrát je čas, za který výpočtový proud I<sub>p</sub> způsobí stejné ztráty jako skutečný procházející proměnný proud I(t). Matematicky vyjádřeno:

$$T = \int_0^{8760} \frac{I(t)^2 \cdot dt}{I_p^2} \text{ (hod)} \quad (4.35)$$

V případě konstantních hodnot proudu v jednotlivých časových úsecích:

$$T = \frac{I_1^2 \cdot t_1 + I_2^2 \cdot t_2 + \dots + I_n^2 \cdot t_n}{I_p^2} \text{ (hod)} \quad (4.36)$$

Pro součet pořizovacích a provozních nákladů, a tak získání výsledných nákladů na vedení, je nutné provozní náklady, které budou vynaloženy v budoucnu, diskontovat na ekvivalentní současnou hodnotu.

$$N_{p1} = 3 \cdot 0,001 \cdot \rho_{45} \cdot \frac{l}{S} \cdot I_p^2 \cdot T \cdot C_{kWh} \cdot \frac{1}{1 + \frac{i}{100}} \text{ (Kč)} \quad (4.37)$$

i diskontní sazba (%), při neznalosti přesné hodnoty lze uvažovat 5%

Pokud je možnost, že v budoucnu dojde ke zvýšení zatížení nebo k nárůstu ceny elektrické energie doplníme vztah o součinitel B, který toto zahrnuje.

$$N_p = 3 \cdot 0,001 \cdot \rho_{45} \cdot \frac{l}{S} \cdot I_p^2 \cdot T \cdot C_{kWh} \cdot \frac{B}{1 + \frac{i}{100}} \text{ (Kč)} \quad (4.38)$$

N <sub>p</sub>	současná hodnota provozních nákladů
B	součinitel zahrnující nárůst zatížení, ceny el. energie za dobu ekonomické životnosti vedení a diskontní sazbu

$$B = \sum_{n=1}^{T_z} (r^{n-1}) = \frac{1 - r^{T_z}}{1 - r} \quad (4.39)$$

$$r = \frac{\left(1 + \frac{a}{100}\right)^2 \cdot \left(1 + \frac{b}{100}\right)}{\left(1 + \frac{i}{100}\right)} \quad (4.40)$$

T <sub>z</sub>	ekonomická doba životnosti (uvažuje se menší či rovna fyzické životnosti)
a	roční nárůst zatížení (%/rok)
b	roční nárůst ceny el. energie (%/rok)

Pro zjednodušení je uvažována diskontní sazba a roční nárůst zatížení a ceny el. energie

za konstantní. Pokud by se tyto parametry měnily, museli bychom celé období rozparcelovat na menší období, které bychom řešili zvlášť.

- Celkové náklady

$$N_c = N_i + N_p \quad (4.41)$$

$$N_c = C_k \cdot S \cdot l + 0,003 \cdot \rho_{45} \cdot \frac{l}{S} \cdot I_p^2 \cdot T \cdot C_{kWh} \cdot \frac{B}{1 + \frac{i}{100}} \quad (4.42)$$

- Hospodárný (optimální) průřez vodiče jedné fáze

Známe již celkové náklady na vedení a nyní dopočteme optimální průřez. Hledáme tedy minimum hodnoty celkových nákladů za jeho ekonomickou životnost. Tu získáme první derivací celkových nákladů podle průřezu a položíme rovnou nule.

$$\frac{dN_c}{dS} = 0 \quad (4.43)$$

$$(C_k \cdot l) - \left( 0,003 \cdot \rho_{45} \cdot \frac{l}{S^2} \cdot I_p^2 \cdot T \cdot C_{kWh} \cdot \frac{B}{1 + \frac{i}{100}} \right) = 0 \quad (4.44)$$

Úpravami dostaneme optimální průřez vodiče jedné fáze trojfázového vedení:

$$S_o = 0,055 \cdot I_p \cdot \sqrt{\frac{C_{kWh}}{C_k} \cdot \rho_{45} \cdot T \cdot \frac{B}{1 + \frac{i}{100}}} \quad (mm^2) \quad (4.45)$$

Obdobně pro optimální průřez pracovního vodiče jednofázového vedení:

$$S_o = 0,045 \cdot I_p \cdot \sqrt{\frac{C_{kWh}}{C_k} \cdot \rho_{45} \cdot T \cdot \frac{B}{1 + \frac{i}{100}}} \quad (mm^2) \quad (4.46)$$

Výsledný optimální průřez volíme nejbližší normalizovaný k optimálnímu průřezu, který jsme vypočítali. Tímto výpočtem lze snížit celkové náklady na vedení až o 50%. Konkrétní výpočet vedení bude uveden v následující kapitole pomocí programového nástroje Sichr od firmy OEZ.

Tato kapitola byla zpracována na základě informací z níže uvedeného zdroje [11] a znalostí absolvovaného studia.

### **Kontrola na odpojení - Ochrana proti nebezpečnému dotyku**

Aby mohlo být jakékoliv elektrické zařízení provozováno, musí být zajištěna ochrana před úrazem elektrickým proudem.

Všeobecně je možné zajistit tuto ochranu čtyřmi způsoby a vždy minimálně jeden



ze způsobu musí být použit.

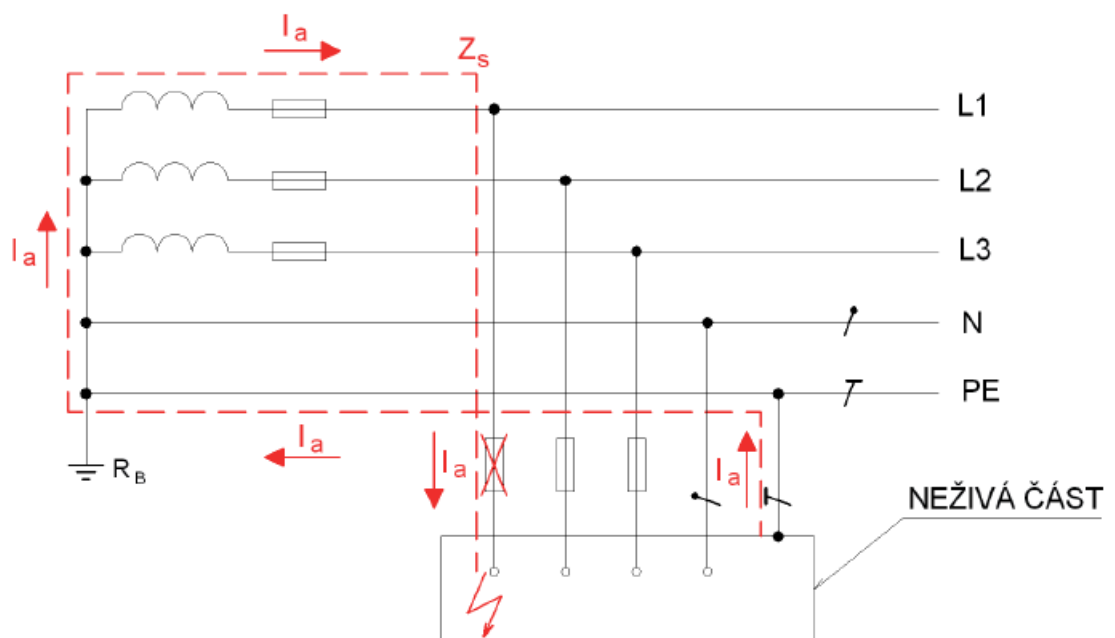
- automatické odpojení od zdroje
- dvojitá nebo zesílená izolace
- elektrické oddělení od napájení jednoho spotřebiče
- malé napětí

Nejpoužívanější je automatické odpojení od zdroje.

### Ochrana automatickým odpojením od zdroje v síti TN

Ochrana spočívá v základní izolaci živých částí přepážkami či kryty a ochrana při poruše je zajištěna ochranným pospojováním a v případě poruchy zapůsobí automatické odpojení od zdroje. Zařízením, které automaticky odpojí od zdroje, bývá většinou pojistka nebo jistič, ale může jím být i proudový chránič. Musí dojít k přerušení vodičů nebo elektrického obvodu v případě poruchy o zanedbatelné impedanci mezi vodičem a neživou částí nebo ochranným vodičem v obvodu. Maximální čas pro napětovou hladinu 400V a síť TN je 5 sekund. Do této doby musí dojít k odpojení od zdroje.

V síti TN musí být nulový bod uzemněn. Neživé části musí být spojeny za pomoci ochranného vodiče s hlavním uzemněním, a to musí být spojeno s uzemněným bodem silové instalace. Princip je znázorněn na Obr. 4.7.



Obr. 4.7: Princip ochrany při poruše automatickým odpojením od zdroje v síti TN [10]

Pro správnou funkci ochrany musí platit podmínka 4.47.

$$Z_s \cdot I_a \leq U_f \quad (4.47)$$

Impedance  $Z_s$  je impedance poruchové smyčky, kterou protéká poruchový proud  $I_a$ , na který musí ochrana reagovat.

Tato podmínka musí být splněna i za nejnejpříznivějších podmínek. To znamená, pokud například je zvýšený činný odpor vedení v důsledku zvýšené teploty, zvýšená impedance zařízení nebo pokud je snižené napětí například v důsledku zkratu. Vyšší impedance znamená nižší poruchový proud. Při kontrole je tedy nutné brát tyto parametry v úvahu.

V této práci se při kontrole využívá porovnání impedance.

Musí platit podmínka 4.48, že impedance poruchové smyčky musí být nižší než impedance smyčky pro poruchový proud v čase  $t_{max} = 5s$ .

$$Z_s \leq Z_s(t_{max}) \quad (4.48)$$

Impedance smyčky pro poruchový proud v maximálním čase se vypočte ze vztahu 4.49.

$$Z_s(t_{max}) = \frac{U_f}{I_a} = \frac{U_f}{1,1 \cdot I_i} \quad (4.49)$$

Proud  $I_i$  je odečtený z vypínací charakteristiky použitého prvku pro čas 5 sekund a je vynásoben koeficientem 1,1, který respektuje spuštění nezávislé zkratové spouště v rozmezí  $\pm 10\%$ . Proud  $I_a$  pak respektuje horní hranici tolerančního pásma.

Praktická výpočet je proveden v 5. kapitole.

Tato kapitola byla zpracována na základě informací z níže uvedených zdrojů [10] a [24] a znalostí z absolvovaného studia.

## 5. Modelový příklad FVE

Celý modelový příklad vychází ze skutečné fotovoltaické elektrárny. Kompletní schéma DC a AC rozvodů spolu s jistíci prvky a ostatními zařízeními je nakresleno v programu AutoCad. DC část FVE je tvořena celkem 8000 panely. Jedno PV pole tvoří 4 řetězce a v jednom řetězci je 20 panelů spojených do série. PV pole je vyvedeno do měniče. Měniče jsou po deseti zapojeny do rozvaděče. FVE disponuje celkem 10-ti rozvaděči. FVE dosahuje výkonu téměř 1,9MW. Výkon je vyveden do DS 22kV přes dva transformátory 22/0,42kV, každý o zdánlivém výkonu 1MVA. Kompletní náčrtek s detaily FVE nalezneme v přílohách konkrétně *Příloha A: Náčrtek FVE*.

### 5.1 Dimenzování a jištění stejnosměrných rozvodů

Návrh začíná seřazením panelů do řetězců, které jsou následně spojeny do pole a vyvedeny do měniče. Panel, který byl vybrán pro FVE, je typ Yingli Solar YL235P - 29b. Měnič je od firmy Refusol, typ Refusol 020K. Parametry panelu a měniče jsou uvedeny v *Tab. 5.1*.

*Tab. 5.1 Parametry panelu Yingli Solar YL235P - 29b a měniče Refusol 020K*

panel Yingli Solar YL235P - 29b		Měnič Refusol 020K	
$P_{STC}$	235W	$P_{DCmax}$	21,1kW
počet článků	60	$U_{DC}$	480 - 850V
$I_{MPP}$	7,97A	$I_{DCmax}$	41A
$U_{MPP}$	29,5V	$P_{ACmax}$	19,2kW
$I_k$	8,54A	$U_{AC}$	3AC 400V + N, 50 - 60Hz
$U_k$	37V	$I_{ACmax}$	29A
$\eta_{max}$	14,4%	$\cos \varphi$	0,9i - 1 - 0,9c
délka	1650mm		
šířka	990mm		
výška	50mm		

Řetězec je složen z 20 panelů a pole se skládá ze 4 řetězců. Přibližný výkon, který je sveden do měniče činí přibližně 20 kW. Schéma řetězce zapojeného do měniče je na *Obr. 5.1*.

Proud tekoucí řetězcem je stejný jako proud jednoho panelu tedy  $I_{MPP} = I_{\dot{R}} = 7,97A$ . Napětí řetězce je nutné spočítat, vztah 5.1.

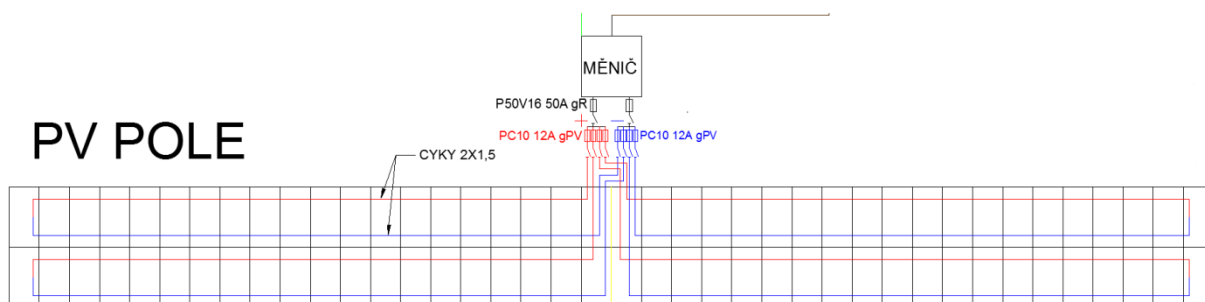
$$U_{\dot{R}} = 20 \cdot U_{MPP} = 20 \cdot 29,5 = 590V \quad (5.1)$$

Stejnoseměrný proud vstupující do měniče neboli proud celého PV pole je proud  $I_P$  vypočten dle rovnice 5.2.

$$I_P = 4 \cdot I_{\check{R}} = 4 \cdot 7,97 = 31,88A \quad (5.2)$$

Výkon jednoho PV pole:

$$P_P = U_{\check{R}} \cdot I_P = 590 \cdot 7,97 = 18,809kW \quad (5.3)$$



Obr. 5.1 Schéma jednoho PV pole

### Návrh pojistky pro jištění řetězců

V kapitole 4. Jištění FVE jsme si již naznačili, jak se dimenzují pojistky pro DC stranu FVE. Je nutné vycházet z napětí naprázdno  $U_0$  a zkratového proudu  $I_k$ .

Nejnižší jmenovité napětí pojistky:

$$U_{Np} \geq 1,2 \cdot 20 \cdot U_0 = 1,2 \cdot 20 \cdot 37 = 888V \quad (5.4)$$

Nejnižší jmenovitý proud pojistky:

$$I_{Np} \geq 1,4 \cdot I_k = 1,4 \cdot 8,54 = 11,956A \quad (5.5)$$

Jako výrobce jisticích prvků byla vybrána firma OEZ. Z katalogu byla vybrána vyhovující pojistka PC10 12A gPV. Pojistka má jmenovité napětí 1000V, jmenovitý proud 12A a charakteristiku gPV. Pojistka je válcová s rozměry 10x38mm. K pojistce bude přiřazen příslušný odpojovač.

### Návrh pojistky pro jištění polí

Opět je nutné vycházet z napětí naprázdno  $U_0$  a zkratového proudu  $I_k$ .

Nejnižší jmenovité napětí pojistky zůstává stejné jako u řetězce tedy:

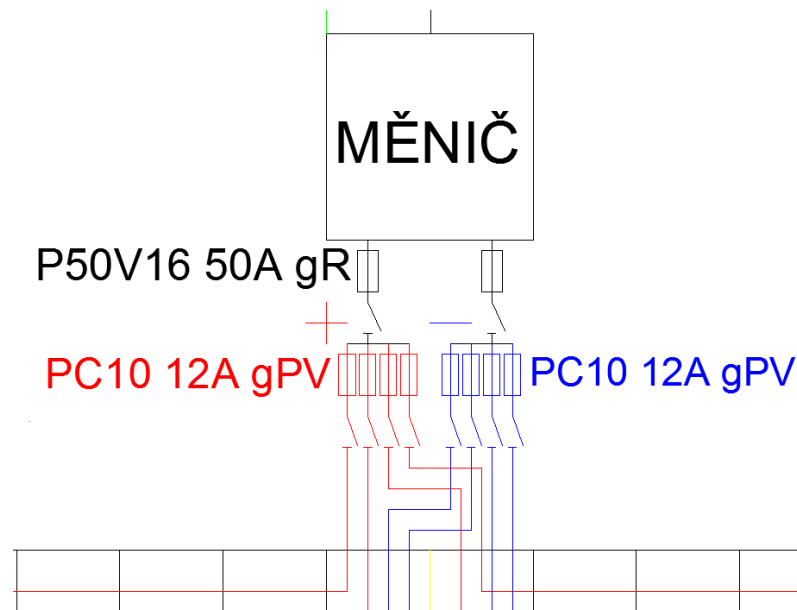
$$U_{Np} \geq 1,2 \cdot 20 \cdot U_0 = 1,2 \cdot 20 \cdot 37 = 888V \quad (5.6)$$

Nejnižší jmenovitý proud pojistky:

$$I_{Np} \geq 1,4 \cdot 4 \cdot I_k = 1,4 \cdot 4 \cdot 8,54 = 47,824A \quad (5.7)$$

Z katalogu OEZ bylo poměrně obtížné najít vyhovující pojistku. Pokud vyhovovala proudově, nevyhovovala napěťově. Pokud vyhovovala napěťově, nevyhovovala proudově. Pokud se již našla vhodná pojistka z hlediska napětí i proudu byl problém s charakteristikou, která byla pouze aR, což je ochrana pouze proti zkratu nikoliv přetížení. Ve finále byla vybrána vyhovující pojistka P50V16 50A gR. Pojistka má jmenovité napětí 1100V, jmenovitý

proud 50A a charakteristiku gR. Pojistka je šroubová s roztečí 170mm a šroubem M10. K pojistce bude přiřazen příslušný odpojovač.



Obr. 5.2 Detailní schéma jištění jednoho PV pole

### Dimenzování vodiče DC

Z katalogu kabelů NKT volím CYKY 2x1,5 s maximálním jmenovitým proudem 22A.

a) Dovolená proudová zatížitelnost

Předpokládáme uložení ve vzduchu na perforované lávce a teplota okolí 45°C.

Koeficienty jsou tedy  $k_1 = 0,79$  a  $k_2 = 0,9$ .

$$I_p = 7,97A$$

$$\frac{I_p}{k_1 \cdot k_2} \leq I_N \rightarrow \frac{7,97}{0,79 \cdot 0,9} \leq I_N \rightarrow 11,21A \leq 22A \quad (5.8)$$

b) Dovolенý úbytek napětí na vodiči

$$R_k = 12,1\Omega/km$$

$$l = 20m$$

$$\Delta U = R_k \cdot l \cdot I_p \cdot \cos \varphi_p + X_k \cdot l \cdot I_p \cdot \sin \varphi_p = 12,1 \cdot 0,02 \cdot 7,97 \cdot 1 = 1,93V \quad (5.9)$$

$$\Delta U_{\%} = \frac{\Delta U}{U_N} \cdot 100 = \frac{1,93}{590} \cdot 100 = 0,33\% \quad (5.10)$$

c) Kontrola na oteplení zkratovými proudy

$$I_{th} = k_e \cdot I_k'' = 1 \cdot 8,54 = 8,54A \quad (5.11)$$

$$S_{MIN} = \frac{I_{th} \cdot \sqrt{t_k}}{K} = \frac{8,54 \cdot \sqrt{0,001}}{114} = 0,002mm^2 \quad (5.12)$$

$$S \geq S_{MIN} \rightarrow 1,5 \geq 0,002 \quad (5.13)$$

Z výše uvedených výpočtů je patrné, že daný kabel plně vyhovuje.

Kontrola navržené pojistky PC10 12A gPV:

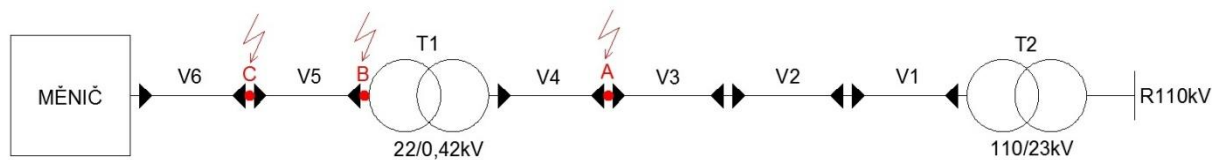
$$I_p \leq I_{Np} \leq I_{dov} \rightarrow 7,97 \leq 12 \leq 15,64 \quad (5.14)$$

$$I_{dov} = k_1 \cdot k_2 \cdot I_N = 0,79 \cdot 0,9 \cdot 22 = 15,64A \quad (5.15)$$

$$I_{Np} \leq K_p \cdot I_{dov} \rightarrow 12 \leq 0,9 \cdot 15,64 = 14,08A \quad (5.16)$$

## 5.2 Dimenzování a jištění přípojného kabelu a střídavých rozvodů

Pro dimenzování přípojného kabelu a kabelů pro střídavý rozvod ve fotovoltaické elektrárně je nutné znát hodnoty proudu, který teče jednotlivými vodiči. Dále je nutné znát také hodnoty zkratového proudu v jednotlivých bodech, příslušející pro daný kabel. Schéma elektrické sítě, do které je zapojená FVE a ve kterém jsou řešeny zkratové poměry, je na *Obr. 5.3* a náhradní schéma je znázorněno na *Obr. 5.4*.



*Obr. 5.3 Schéma elektrické sítě pro řešení zkratových poměrů*

- V1 vývodní kabel od transformátoru T2 110/23kV
- V2 kmenová linka vedení 22kV
- V3 odbočková linka vedení 22kV
- V4 přípojný kabel FVE do DS
- V5 kabel spojující hlavní rozvaděč s podružným rozvaděčem
- V6 kabel spojující podružný rozvaděč s měničem



*Obr. 5.4 Náhradní schéma elektrické sítě pro řešení zkratových poměrů*

- Zs impedance sítě 110kV
- Zt2,Zt1 impedance transformátorů
- Zv1-5 impedance jednotlivých vedení

**Výpočet zkratových poměrů v bodě A**

Při výpočtech respektujeme odpor i reaktanci a jmenovitý převod přes transformátory. Zaokrouhleno je na tři desetinná místa.

Síť 110kV

$$S_k'' = 1090 \text{MVA}$$

$$I_k'' = 5,7 \text{kA}$$

$$R = 0,1 \text{Z}$$

$$Z_s = c \cdot \frac{U_N^2}{S_k''} \cdot \frac{23^2}{110^2} = 1,1 \cdot \frac{110^2}{1090} \cdot \frac{23^2}{110^2} = 0,534 \Omega \quad (5.17)$$

$$R_s = 0,1 \cdot Z_s = 0,1 \cdot 0,534 = 0,053 \Omega \quad (5.18)$$

$$X_s = \sqrt{Z_s^2 - R_s^2} = \sqrt{0,534^2 - 0,053^2} = 0,531 \Omega \quad (5.19)$$

Transformátor T2 110/23kV

$$S_{T2} = 40 \text{MVA}$$

$$u_k \% = 10\%$$

$$\Delta P_k = 86 \text{kW}$$

$$Z_{T2} = \frac{u_k \%}{100} \cdot \frac{U_N^2}{S_{T2}} \cdot \frac{23^2}{110^2} = \frac{10}{100} \cdot \frac{110^2}{40} \cdot \frac{23^2}{110^2} = 1,323 \Omega \quad (5.20)$$

$$R_{T2} = \frac{\Delta P_k}{S_{T2}} \cdot \frac{U_N^2}{S_{T2}} \cdot \frac{23^2}{110^2} = \frac{0,086}{40} \cdot \frac{110^2}{40} \cdot \frac{23^2}{110^2} = 0,028 \Omega \quad (5.21)$$

$$X_{T2} = \sqrt{Z_{T2}^2 - R_{T2}^2} = \sqrt{1,323^2 - 0,028^2} = 1,323 \Omega \quad (5.22)$$

Vývodní kabel V1 od transformátoru T2 110/23kV

Typ: AXEKCY 240mm<sup>2</sup>

$$R_k = 0,125 \Omega/\text{km}$$

$$L = 0,34 \text{mH}/\text{km}$$

$$l = 300 \text{m}$$

$$X_k = \omega \cdot L = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,34 \cdot 10^{-3} = 0,107 \Omega/\text{km} \quad (5.23)$$

$$R_{V1} = R_k \cdot l = 0,125 \cdot 0,3 = 0,038 \Omega \quad (5.24)$$

$$X_{V1} = X_k \cdot l = 0,107 \cdot 0,3 = 0,032 \Omega \quad (5.25)$$

$$Z_{V1} = \sqrt{R_{V1}^2 + X_{V1}^2} = \sqrt{0,038^2 + 0,032^2} = 0,050 \Omega \quad (5.26)$$

Kmenová linka V2

Typ: AlFe6 120mm<sup>2</sup>

$$R_k = 0,234 \Omega/\text{km}$$

$$X_k = 0,421\Omega/\text{km}$$

$$l = 9\text{km}$$

$$R_{V2} = R_k \cdot l = 0,234 \cdot 9 = 2,106\Omega \quad (5.27)$$

$$X_{V2} = X_k \cdot l = 0,421 \cdot 9 = 3,789\Omega \quad (5.28)$$

$$Z_{V2} = \sqrt{R_{V2}^2 + X_{V2}^2} = \sqrt{2,106^2 + 3,789^2} = 4,335\Omega \quad (5.29)$$

### Odbočková linka V3

$$\text{Typ: AlFe6 } 50\text{mm}^2$$

$$R_k = 0,696\Omega/\text{km}$$

$$X_k = 0,438\Omega/\text{km}$$

$$l = 1,5\text{km}$$

$$R_{V3} = R_k \cdot l = 0,696 \cdot 1,5 = 1,044\Omega \quad (5.30)$$

$$X_{V3} = X_k \cdot l = 0,438 \cdot 1,5 = 0,657\Omega \quad (5.31)$$

$$Z_{V3} = \sqrt{R_{V3}^2 + X_{V3}^2} = \sqrt{1,044^2 + 0,657^2} = 1,234\Omega \quad (5.32)$$

### Celková impedance v místě zkratu A

$$\begin{aligned} R_{CA} &= R_s + R_{T2} + R_{V1} + R_{V2} + R_{V3} = 0,053 + 0,028 + 0,038 + 2,106 + 1,044 \\ &= 3,269\Omega \end{aligned} \quad (5.33)$$

$$\begin{aligned} X_{CA} &= X_s + X_{T2} + X_{V1} + X_{V2} + X_{V3} = 0,531 + 1,323 + 0,032 + 3,789 + 0,657 \\ &= 6,332\Omega \end{aligned} \quad (5.34)$$

$$Z_{CA} = \sqrt{R_{CA}^2 + X_{CA}^2} = \sqrt{3,269^2 + 6,332^2} = 7,126\Omega \quad (5.35)$$

### Velikost zkratového proudu a výkonu v bodě A

$$I_{kA}'' = c \cdot \frac{U_N}{\sqrt{3} \cdot Z_{CA}} = 1,1 \cdot \frac{22}{\sqrt{3} \cdot 7,126} = 1,961\text{kA} \quad (5.36)$$

$$S_{kA}'' = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_{kA}'' = \sqrt{3} \cdot 22 \cdot 1,961 = 74,724\text{MVA} \quad (5.37)$$

### **Dimenzování přípojného kabelu a návrh jištění**

Z katalogu VN kabelů Draka volím 22-CXEKVCEY 1x35/16mm<sup>2</sup> s maximálním jmenovitým proudem při teplotě 65°C v zemi/vzduchu 170/158A.

a) Dovolená proudová zatížitelnost

#### Výpočet proudu $I_p$

$$P_{FVE} = 1,88\text{MW}$$

$$\text{Volím } \cos \varphi = 1$$



$$S_{FVE} = \frac{P_{FVE}}{\cos \varphi} = \frac{1,88}{1} = 1,88 MVA \quad (5.38)$$

$$I_p = \frac{S_{FVE}}{\sqrt{3} \cdot U} = \frac{1880}{\sqrt{3} \cdot 22} = 49,34 A \quad (5.39)$$

Předpokládáme uložení částečně v zemi a částečně ve vzduchu, a proto budeme řešit oba případy.

1) Uložení ve vzduchu s teplotou 45°C, svisle lávky těsně na sloupu v trubce

$$k_1 = 0,87 \text{ a } k_2 = 0,7$$

$$\frac{I_p}{k_1 \cdot k_2} \leq I_N \rightarrow \frac{49,34}{0,87 \cdot 0,7} \leq I_N \rightarrow 81,02 A \leq 158 A \quad (5.40)$$

2) Uložení v zemi s teplotou 20°C, v trubce 3 vodiče u sebe

Předpokládáme zem hlinitou a vlhkou, a tudíž měrný odpor půdy 0,75 Km/W

$$k_1 = 1, k_2 = 0,98 \text{ a } k_3 = 0,7$$

$$\frac{I_p}{k_1 \cdot k_2 \cdot k_3} \leq I_N \rightarrow \frac{49,34}{1 \cdot 0,98 \cdot 0,7} \leq I_N \rightarrow 71,92 A \leq 170 A \quad (5.41)$$

*Pozn.: Ve výpočtech není započítán koeficient přerušovaného zatěžování, který by proud ještě snížil.*

b) Dovolенý úbytek napětí na vodiči

$$R_k = 0,524 \Omega/km$$

$$L = 0,44 mH/km$$

$$l = 30 m$$

$$X_k = \omega \cdot L = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,44 \cdot 10^{-3} = 0,138 \Omega/km \quad (5.42)$$

$$\begin{aligned} \Delta U_f &= R_k \cdot l \cdot I_p \cdot \cos \varphi_p + X_k \cdot l \cdot I_p \cdot \sin \varphi_p \\ &= 0,524 \cdot 0,03 \cdot 49,34 \cdot 1 + 0,138 \cdot 0,03 \cdot 49,34 \cdot 0 = 0,78 V \end{aligned} \quad (5.43)$$

$$\Delta U_{\%} = \frac{\sqrt{3} \cdot \Delta U_f}{U_N} \cdot 100 = \frac{\sqrt{3} \cdot 0,78}{22000} \cdot 100 = 0,006\% \quad (5.44)$$

c) Kontrola na oteplení zkratovými proudy

$$I_{th} = \sqrt{m+n} \cdot I_{kA}'' = \sqrt{0,023+1} \cdot 1961 = 1983,4 A \quad (5.45)$$

$$m = \frac{1}{2 \cdot f \cdot t_k \cdot \ln(\kappa-1)} \cdot [e^{4 \cdot f \cdot t_k \cdot \ln(\kappa-1)} - 1] \quad (5.46)$$

$$= \frac{1}{2 \cdot 50 \cdot 0,3 \cdot \ln(1,228-1)} \cdot [e^{4 \cdot 50 \cdot 0,3 \cdot \ln(1,228-1)} - 1] = 0,023$$

$$\kappa = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \cdot \frac{R_{CA}}{X_{CA}}} = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \cdot \frac{3,269}{6,332}} = 1,228 \quad (5.47)$$

$$S_{MIN} = \frac{I_{th} \cdot \sqrt{t_k}}{K} = \frac{1983,4 \cdot \sqrt{0,3}}{141} = 7,70 \text{mm}^2 \quad (5.48)$$

$$S \geq S_{MIN} \rightarrow 35 \geq 7,70 \quad (5.49)$$

Z výše uvedených výpočtů je patrné, že daný kabel plně vyhovuje.

### Návrh jištění primární strany transformátoru

Volíme pojistkovou vložku VN typu PM45 se jmenovitým proudem 50A. Pojistka slouží jako ochrana na primární straně transformátoru T1 22/0,42kV. Podmínka na minimálně dvojnásobný jmenovitý proud pojistky oproti proudu protékajícímu je splněna viz 5.50 a 5.51.

#### Kontrola navržené pojistky VN PM45 50A:

$$I_{Np} \geq 2 \cdot I_{T1} \rightarrow 50 \geq 49,34 \quad (5.50)$$

$$I_{T1} = \frac{I_p}{2} = \frac{49,34}{2} = 24,67 \text{A} \quad (5.51)$$

$$I_{kA}'' \leq I_1 \rightarrow 1,961 \leq 50 \quad (5.52)$$

### Výpočet zkratových poměrů v bodě B

Pro dimenzování vodičů na straně nízkého napětí (NN) je nutné znát zkratové poměry v tomto místě. Zkratové poměry ovlivní hlavně transformátor T1. Pro dimenzování vodiče od hlavního rozvaděče (HR) k podružným rozvaděčům (Rx) je nezbytné znát zkratové poměry hned za transformátorem T1 (bod B).

Velikost impedance k transformátoru T1 již známe z předchozích výpočtů. Nyní je nutné ji přepočítat na hladinu NN přes jmenovitý převod transformátoru.

#### Přípojný kabel V4

Typ: 22 - CXEKVCEY 1x35/16mm<sup>2</sup>

R<sub>k</sub> = 0,524Ω/km

x<sub>k</sub> = 0,138 Ω /km

l = 30m

$$R_{V4} = R_k \cdot l \cdot \frac{0,42^2}{22^2} = 0,524 \cdot 0,03 \cdot \frac{0,42^2}{22^2} = 0,006 \text{m}\Omega \quad (5.53)$$

$$X_{V4} = X_k \cdot l \cdot \frac{0,42^2}{22^2} = 0,138 \cdot 0,03 \cdot \frac{0,42^2}{22^2} = 0,002 \text{m}\Omega \quad (5.54)$$

$$Z_{V4} = \sqrt{R_{V4}^2 + X_{V4}^2} = \sqrt{0,006^2 + 0,002^2} = 0,006 \text{m}\Omega \quad (5.55)$$

#### Transformátor T1 22/0,42kV

S<sub>T1</sub> = 1MVA

$$u_k\% = 6\%$$

$$\Delta P_k = 10,5\text{kW}$$

$$Z_{T1} = \frac{u_k\%}{100} \cdot \frac{U_N^2}{S_{T1}} \cdot \frac{0,42^2}{22^2} = \frac{6}{100} \cdot \frac{22^2}{1} \cdot \frac{0,42^2}{22^2} = 10,584\text{m}\Omega \quad (5.56)$$

$$R_{T1} = \frac{\Delta P_k}{S_{T1}} \cdot \frac{U_N^2}{S_{T1}} \cdot \frac{0,42^2}{22^2} = \frac{0,0105}{1} \cdot \frac{22^2}{1} \cdot \frac{0,42^2}{22^2} = 1,852\text{m}\Omega \quad (5.57)$$

$$X_{T1} = \sqrt{Z_{T1}^2 - R_{T1}^2} = \sqrt{10,584^2 - 1,852^2} = 10,421\text{m}\Omega \quad (5.58)$$

Přepočítání odporu  $R_{CA}$  a reaktance  $X_{CA}$  na hladinu NN

$$R_{CANN} = R_{CA} \cdot l \cdot \frac{0,42^2}{22^2} = 3,269 \cdot \frac{0,42^2}{22^2} = 1,197\text{m}\Omega \quad (5.59)$$

$$X_{CANN} = X_{CA} \cdot l \cdot \frac{0,42^2}{22^2} = 6,332 \cdot \frac{0,42^2}{22^2} = 2,309\text{m}\Omega \quad (5.60)$$

Celková impedance v místě zkratu B

$$R_{CB} = R_{CANN} + R_{T1} = 1,197 + 1,852 = 3,049\text{m}\Omega \quad (5.61)$$

$$X_{CB} = X_{CANN} + X_{T1} = 2,309 + 10,421 = 12,730\text{m}\Omega \quad (5.62)$$

$$Z_{CB} = \sqrt{R_{CB}^2 + X_{CB}^2} = \sqrt{3,049^2 + 12,730^2} = 13,090\text{m}\Omega \quad (5.63)$$

Velikost zkratového proudu a výkonu v bodě B

$$I_{kB}'' = c \cdot \frac{U_N}{\sqrt{3} \cdot Z_{CB}} = 1,1 \cdot \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 13,090} = 33,61\text{kA} \quad (5.64)$$

$$S_{kB}'' = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_{kB}'' = \sqrt{3} \cdot 0,4 \cdot 33,61 = 23,29\text{MVA} \quad (5.65)$$

### **Dimenzování kabelu od HR k jednotlivým Rx**

Z katalogu NKT volím 1-CYKY 3x240+120 s maximálním jmenovitým proudem v zemi/vzduchu 473/445A. Podmínky, na které se dimenzuje, bereme ty nejhorší.

a) Dovolená proudová zatížitelnost

Výpočet proudu  $I_p$

Výkon měniče  $P_M = 18,809\text{kW}$

Volím  $\cos \varphi = 1$

Proud od měniče k Rx:

$$I_{MR} = \frac{P_M}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \varphi} = \frac{18,809}{\sqrt{3} \cdot 0,4 \cdot 1} = 27,15\text{A} \quad (5.66)$$

$$I_p = 10 \cdot I_{MR} = 10 \cdot 27,15 = 271,5\text{A} \quad (5.67)$$

Předpokládáme uložení v zemi s tepelným měrným odporem 0,75K $\text{m}/\text{W}$  a pět kabelů

uložených v ochranné trubce u sebe. Koeficienty jsou  $k_1 = 1$ ,  $k_2 = 0,98$  a  $k_3 = 0,65$

$$\frac{I_p}{k_1 \cdot k_2 \cdot k_3} \leq I_N \rightarrow \frac{271,5}{1 \cdot 0,98 \cdot 0,65} \leq I_N \rightarrow 426,22A \leq 473A \quad (5.68)$$

*Pozn.: Ve výpočtech není započítán koeficient přerušovaného zatěžování, který by proud ještě snížil.*

b) Dovolенý úbytek napětí na vodiči

$$R_k = 0,075\Omega/\text{km}$$

$$L = 0,24\text{mH}/\text{km}$$

$l = 380\text{m}$  (nejdelší vodič v rozvodu)

$$X_k = \omega \cdot L = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,24 \cdot 10^{-3} = 0,075\Omega/\text{km} \quad (5.69)$$

$$\begin{aligned} \Delta U_f &= R_k \cdot l \cdot I_p \cdot \cos \varphi_p + X_k \cdot l \cdot I_p \cdot \sin \varphi_p \\ &= 0,075 \cdot 0,38 \cdot 271,5 \cdot 1 + 0,075 \cdot 0,38 \cdot 271,5 \cdot 0 = 7,74V \end{aligned} \quad (5.70)$$

$$\Delta U_{\%} = \frac{\sqrt{3} \cdot \Delta U_f}{U_N} \cdot 100 = \frac{\sqrt{3} \cdot 7,74}{400} \cdot 100 = 3,35\% \quad (5.71)$$

c) Kontrola na oteplení zkratovými proudy

$$I_{th} = \sqrt{m+n} \cdot I_{kB}'' = \sqrt{0,673+1} \cdot 33610 = 43472,7A \quad (5.72)$$

$$\begin{aligned} m &= \frac{1}{2 \cdot f \cdot t_k \cdot \ln(\kappa-1)} \cdot [e^{4 \cdot f \cdot t_k \cdot \ln(\kappa-1)} - 1] \\ &= \frac{1}{2 \cdot 50 \cdot 0,02 \cdot \ln(1,498-1)} \cdot [e^{4 \cdot 50 \cdot 0,02 \cdot \ln(1,498-1)} - 1] = 0,673 \end{aligned} \quad (5.73)$$

$$\kappa = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \cdot \frac{R_{CB}}{X_{CB}}} = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \cdot \frac{3,049 \cdot 10^{-3}}{12,730 \cdot 10^{-3}}} = 1,498 \quad (5.74)$$

$$S_{MIN} = \frac{I_{th} \cdot \sqrt{t_k}}{K} = \frac{43472,7 \cdot \sqrt{0,02}}{114} = 53,93\text{mm}^2 \quad (5.75)$$

$$S \geq S_{MIN} \rightarrow 240 \geq 53,93 \quad (5.76)$$

Z výše uvedených výpočtů je patrné, že daný kabel dostatečně vyhovuje.

d) Návrh jištění kabelu HR-Rx

Kabel bude chráněn 3pólovým jističem od firmy OEZ typ: Modeion BH630NE305 se jmenovitým proudem 290A, zkratový proud max. 36kA a doba vypnutí 20ms. Nadproudová spoušť bude typ: SE-BH-0400-DTV3. Jistič bude opatřen příslušným odpínačem.

Kontrola navrženého jističe Modeion BH630NE305:

$$I_p \leq I_{Np} \leq I_{dov} \rightarrow 271,5 \leq 290 \leq 301,3 \quad (5.77)$$

$$I_{dov} = k_1 \cdot k_2 \cdot I_N = 1 \cdot 0,98 \cdot 0,65 \cdot 473 = 301,3A \quad (5.78)$$

$$I_{Np} \leq K_p \cdot I_{dov} \rightarrow 290 \leq 1 \cdot 301,3 = 301,3A \quad (5.79)$$

Podmínky pro jistič:

$$I_k'' \leq I_{cu} \rightarrow 33,61kA \leq 36kA \quad (5.80)$$

$$i_p \leq I_{cm} \rightarrow 71,2kA \leq 75kA \quad (5.81)$$

$$i_p = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I_k'' = 1,498 \cdot \sqrt{2} \cdot 33,61 = 71,2kA \quad (5.82)$$

$$I_{th} \leq I_{cw} \rightarrow 6,15kA \leq 6,5kA \quad (5.83)$$

$$I_{th20ms}^2 \cdot t_{k20ms} = I_{th1s}^2 \cdot t_{k1s} \rightarrow I_{th1s} = 43,47 \cdot \sqrt{0,02} = 6,15kA \quad (5.84)$$

**Návrh chránění sekundární strany transformátoru T1 22/0,42kV**

Velikost proudu na sekundární straně transformátoru T1:

$$I_p = 5 \cdot 10 \cdot I_{MR} = 5 \cdot 10 \cdot 27,15 = 1357,5A \quad (5.85)$$

$$I_N \geq I_p \rightarrow I_N \geq 1357,5A \quad (5.86)$$

Transformátor bude chráněn 3pólovým jističem od firmy OEZ typ: Modeion BL1600S se jmenovitým proudem 1600A, zkratový proud max. 65kA a doba vypnutí 30ms. Nadproudová spoušť DTV3 - charakteristika D - distribuční pro chránění transformátorů. Jistič bude také opatřen příslušným odpínačem.

Podmínky pro jistič:

$$I_k'' \leq I_{cu} \rightarrow 33,61kA \leq 65kA \quad (5.87)$$

$$i_p \leq I_{cm} \rightarrow 71,2kA \leq 140kA \quad (5.88)$$

$$i_p = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I_k'' = 1,498 \cdot \sqrt{2} \cdot 33,61 = 71,2kA \quad (5.89)$$

$$I_{th} \leq I_{cw} \rightarrow 7,53kA \leq 20kA \quad (5.90)$$

$$I_{th30ms}^2 \cdot t_{k30ms} = I_{th1s}^2 \cdot t_{k1s} \rightarrow I_{th1s} = 43,47 \cdot \sqrt{0,03} = 7,53kA \quad (5.91)$$

**Výpočet zkratových poměrů v bodě C**

Zkratový proud v bodě C je potřebné znát pro dimenzování vodičů mezi podružným rozvaděčem a měniči. Musíme tedy vypočítat impedanci na vodiči mezi hlavním rozvaděčem a podružným rozvaděčem. Zkrat budeme brát v úvahu za nejkratším vodičem mezi HR a Rx.

Velikost impedance do bodu B známe. Impedanci v bodě C získáme sečtením odporu a reaktance kabelu HR - Rx a odporu a reaktance v bodě B.

Kabel HR - Rx V5

Typ: 1 - CYKY 3x240 + 120mm<sup>2</sup>

R<sub>k</sub> = 0,075Ω/km

X<sub>k</sub> = 0,075 Ω /km

l = 20m (nejkratší vodič v rozvodu)

$$R_{V5} = R_k \cdot l = 0,075 \cdot 0,02 = 1,5m\Omega \quad (5.92)$$

$$X_{V5} = X_k \cdot l = 0,075 \cdot 0,02 = 1,5m\Omega \quad (5.93)$$

$$Z_{V5} = \sqrt{R_{V5}^2 + X_{V5}^2} = \sqrt{1,5^2 + 1,5^2} = 2,121m\Omega \quad (5.94)$$

#### Celková impedance v místě zkratu C

$$R_{CC} = R_{CB} + R_{V5} = 3,049 + 2,121 = 5,17m\Omega \quad (5.95)$$

$$X_{CC} = X_{CB} + X_{V5} = 12,730 + 2,121 = 14,851m\Omega \quad (5.96)$$

$$Z_{CC} = \sqrt{R_{CC}^2 + X_{CC}^2} = \sqrt{5,17^2 + 14,851^2} = 15,725m\Omega \quad (5.97)$$

#### Velikost zkratového proudu a výkonu v bodě C

$$I_{kC}'' = c \cdot \frac{U_N}{\sqrt{3} \cdot Z_{CC}} = 1,1 \cdot \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 15,725} = 16,15kA \quad (5.98)$$

$$S_{kC}'' = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_{kC}'' = \sqrt{3} \cdot 0,4 \cdot 16,15 = 11,19MVA \quad (5.99)$$

### **Dimenzování kabelu od Rx k jednotlivým měničům (M)**

Z katalogu NKT volím 1-CYKY 4x25mm<sup>2</sup> s maximálním jmenovitým proudem v zemi/vzduchu 132/105A

a) Dovolená proudová zatížitelnost

$$I_p = 27,15A$$

$$\text{Volím } \cos \varphi = 1$$

Předpokládáme uložení částečně v zemi a částečně ve vzduchu, a proto budeme řešit oba případy.

1) Uložení ve vzduchu s teplotou 45°C, svisle lávky těsně i volně, 5 kabelů u sebe

$$k_1 = 0,79 \text{ a } k_2 = 0,625$$

$$\frac{I_p}{k_1 \cdot k_2} \leq I_N \rightarrow \frac{27,15}{0,79 \cdot 0,625} \leq I_N \rightarrow 54,99A \leq 105A \quad (5.100)$$

2) Uložení v zemi s teplotou 20°C, zem je hlinitá a vlhká s tepelným měrným odporem 0,75Km/W a jsou uloženy v ochranné trubce 5 kabelů u sebe

$$k_1 = 1, k_2 = 0,98 \text{ a } k_3 = 0,65$$

$$\frac{I_p}{k_1 \cdot k_2 \cdot k_3} \leq I_N \rightarrow \frac{27,15}{1 \cdot 0,98 \cdot 0,65} \leq I_N \rightarrow 42,62A \leq 132A \quad (5.101)$$

*Pozn.: Ve výpočtech není započítán koeficient přerušovaného zatěžování, který by proud ještě snížil.*

b) Dovolený úbytek napětí na vodiči

$$R_k = 0,727\Omega/km$$

$$L = 0,27\text{mH/km}$$

$$l = 30\text{m (nejdelší vodič)}$$

$$X_k = \omega \cdot L = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,27 \cdot 10^{-3} = 0,085\Omega/\text{km} \quad (5.102)$$

$$\Delta U_f = R_k \cdot l \cdot I_p \cdot \cos \varphi_p + X_k \cdot l \cdot I_p \cdot \sin \varphi_p \quad (5.103)$$

$$= 0,727 \cdot 0,03 \cdot 27,15 \cdot 1 + 0,085 \cdot 0,03 \cdot 27,15 \cdot 0 = 0,59\text{V}$$

$$\Delta U_{\%} = \frac{\sqrt{3} \cdot \Delta U_f}{U_N} \cdot 100 = \frac{\sqrt{3} \cdot 0,59}{400} \cdot 100 = 0,26\% \quad (5.104)$$

c) Kontrola na oteplení zkratovými proudy

$$I_{th} = \sqrt{m+n} \cdot I_{kc}'' = \sqrt{1,072+1} \cdot 16150 = 23247\text{A} \quad (5.105)$$

$$m = \frac{1}{2 \cdot f \cdot t_k \cdot \ln(\kappa - 1)} \cdot [e^{4 \cdot f \cdot t_k \cdot \ln(\kappa - 1)} - 1] \quad (5.106)$$

$$= \frac{1}{2 \cdot 50 \cdot 0,007 \cdot \ln(1,365 - 1)} \cdot [e^{4 \cdot 50 \cdot 0,007 \cdot \ln(1,365 - 1)} - 1]$$

$$= 1,072$$

$$\kappa = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \frac{R_{CC}}{X_{CC}}} = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \frac{5,17 \cdot 10^{-3}}{14,851 \cdot 10^{-3}}} = 1,365 \quad (5.107)$$

$$S_{MIN} = \frac{I_{th} \cdot \sqrt{t_k}}{K} = \frac{23247 \cdot \sqrt{0,007}}{114} = 17,06\text{mm}^2 \quad (5.108)$$

$$S \geq S_{MIN} \rightarrow 25 \geq 17,06 \quad (5.109)$$

Z výše uvedených výpočtů je patrné, že daný kabel dostatečně vyhovuje.

d) Návrh jištění kabelu Rx-M

Kabel bude chráněn 3pólovým jističem od firmy OEZ typ: Modeion BC160NT305-32-D se jmenovitým proudem 32A, zkratový proud max. 25kA a doba vypnutí 7ms.

Kontrola navrženého jističe Modeion BC160NT305-32-D:

$$I_p \leq I_{Np} \leq I_{dov} \rightarrow 27,15 \leq 32 \leq 51,8 \quad (5.110)$$

$$I_{dov} = k_1 \cdot k_2 \cdot I_N = 0,79 \cdot 0,625 \cdot 105 = 51,8\text{A} \quad (5.111)$$

$$I_{Np} \leq K_p \cdot I_{dov} \rightarrow 32 \leq 1 \cdot 51,8 = 51,8\text{A} \quad (5.112)$$

Podmínky pro jistič:

$$I_k'' \leq I_{cu} \rightarrow 16,15\text{kA} \leq 25\text{kA} \quad (5.113)$$

$$i_p \leq I_{cm} \rightarrow 31,2\text{kA} \leq 52\text{kA} \quad (5.114)$$

$$i_p = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I_k'' = 1,365 \cdot \sqrt{2} \cdot 16,15 = 31,2\text{kA} \quad (5.115)$$

$$I_{th} \leq I_{cw} \rightarrow 1,95\text{kA} \leq 2\text{kA} \quad (5.116)$$

$$I_{th20ms}^2 \cdot t_{k20ms} = I_{th1s}^2 \cdot t_{k1s} \rightarrow I_{th1s} = 23,25 \cdot \sqrt{0,007} = 1,95\text{kA} \quad (5.117)$$

### 5.3 Ověření ochrany proti nebezpečnému dotyku

Pro správné nastavení ochran je nutné zkontrolovat, zda správně zafungují i v případě nejmenšího zkratového proudu. Na velikost zkratového proudu má vliv celková impedance, která stojí v cestě zkratovému proudu. Uvažujeme případ, kdy je impedance největší. Pokud máme dva transformátory paralelně, uvažujeme jeden odpojený, to samé u paralelních vedení. Dále vypnuto část zdrojů. Při výpočtu uvažujeme koeficient  $c = 1$ . Odpor uvažujeme o maximální možné teplotě, v případě PVC izolace je to 70°C.

Ověření lze provést třemi způsoby:

- a) pomocí impedance smyčky
- b) pomocí délky poruchové smyčky
- c) pomocí dotykového napětí  $U_0$

V této práci se využije způsobu pomocí impedance smyčky. Z normy je dáno, že odpojení musí proběhnout do 5s a dovolené dotykové napětí je 50V.

#### Kontrola na ochranu proti nebezpečnému dotyku na vodiči HR - Rx

Musí platit základní podmínka:

$$Z_s \leq Z_s(t_{max}) \quad (5.118)$$

#### Výpočet impedance

Využijeme již vypočtené hodnoty odporu a reaktance v bodě B a připočteme k nim hodnoty odporu a reaktance kabelu HR - Rx, protože uvažujeme zkrat až na konci kabelu.

$$R_{CB} = 3,049m\Omega$$

$$X_{CB} = 12,730m\Omega$$

$$Z_{CB} = 15,725m\Omega$$

#### Kabel HR - Rx V5

Typ: 1 - CYKY 3x240 + 120mm<sup>2</sup>

$$R_k = 0,075\Omega/km$$

$$X_k = 0,075 \Omega /km$$

$l = 380m$  (nejdelší vodič v rozvodu)

$$\alpha_{20} = 3,92 \cdot 10^{-3} K^{-1}$$

$$R_{kPEN} = 0,157\Omega/km$$

$$X_{kPEN} = 0,081\Omega /km$$

$$r_{\vartheta} = 1 + \alpha_{20} \cdot (\vartheta_m - \vartheta_0) = 1 + 3,92 \cdot 10^{-3} \cdot (70 - 20) = 1,196 \quad (5.119)$$

$$R_{V5} = r_{\vartheta} \cdot R_k \cdot l = 1,196 \cdot 0,075 \cdot 0,38 = 34,086m\Omega \quad (5.120)$$



$$X_{V5} = X_k \cdot l = 0,075 \cdot 0,38 = 28,5m\Omega \quad (5.121)$$

$$R_{V5PEN} = r_{\theta} \cdot R_{kPEN} \cdot l = 1,196 \cdot 0,157 \cdot 0,38 = 71,353m\Omega \quad (5.122)$$

$$X_{V5PEN} = X_{kPEN} \cdot l = 0,081 \cdot 0,38 = 30,78m\Omega \quad (5.123)$$

Celková impedance

$$\begin{aligned} Z_{s1} &= \sqrt{(R_{CB} + R_{V5} + R_{V5PEN})^2 + (X_{CB} + X_{V5} + X_{V5PEN})^2} \\ &= \sqrt{(3,049 + 34,086 + 71,353)^2 + (12,73 + 28,5 + 30,78)^2} \\ &= 130,212m\Omega \end{aligned} \quad (5.124)$$

$$Z_{s1}(t_{max}) = \frac{U_f}{1,1 \cdot I_i} = \frac{230}{1,1 \cdot 1200} = 174,242m\Omega \quad (5.125)$$

$I_i = 1200A$  proud odečtený z vypínací charakteristiky pro čas  $t_{max} = 5s$

$$Z_{s1} \leq Z_{s1}(t_{max}) \rightarrow 130,212 \leq 174,242 \quad (5.126)$$

Podmínka je splněna, a tak ochrana proti nebezpečnému dotyku je zajištěna.

### **Kontrola na ochranu proti nebezpečnému dotyku na vodiči Rx - M**

Opět musí platit základní podmínka 5.118.

#### **Výpočet impedance**

Využijeme již vypočtené hodnoty odporu a reaktance v bodě C a připočteme k nim hodnoty odporu a reaktance kabelu Rx - M, protože uvažujeme zkrat až na konci kabelu.

$$R_{CC} = 5,17m\Omega$$

$$X_{CC} = 14,851m\Omega$$

$$Z_{CC} = 13,090m\Omega$$

#### Kabel Rx - M V6

Typ: CYKY 4x25mm<sup>2</sup>

$$R_k = 0,727\Omega/km$$

$$X_k = 0,081\Omega/km$$

$l = 30m$  (nejdelší vodič v rozvodu)

$$\alpha_{20} = 3,92 \cdot 10^{-3}K^{-1}$$

$$R_{kPEN} = 0,727\Omega/km$$

$$X_{kPEN} = 0,081\Omega/km$$

$$R_{V6} = r_{\theta} \cdot R_k \cdot l = 1,196 \cdot 0,727 \cdot 0,03 = 26,085m\Omega \quad (5.127)$$

$$X_{V6} = X_k \cdot l = 0,081 \cdot 0,03 = 2,43m\Omega \quad (5.128)$$

$$R_{V6PEN} = r_{\theta} \cdot R_{kPEN} \cdot l = 1,196 \cdot 0,727 \cdot 0,03 = 26,085m\Omega \quad (5.129)$$

$$X_{V6PEN} = X_{kPEN} \cdot l = 0,081 \cdot 0,03 = 2,43m\Omega \quad (5.130)$$

Celková impedance

$$Z_{s2} = \sqrt{(R_{CB} + R_{V5} + R_{V5PE})^2 + (X_{CB} + X_{V5} + X_{V5PE})^2}$$

$$= \sqrt{(5,17 + 26,085 + 26,085)^2 + (14,851 + 2,43 + 2,43)^2} \quad (5.131)$$

$$= 60,633m\Omega$$

$$Z_{s2}(t_{max}) = \frac{U_f}{1,1 \cdot I_i} = \frac{230}{1,1 \cdot 320} = 653,409m\Omega \quad (5.132)$$

$I_i = 320A$  proud odečtený z vypínací charakteristiky pro čas  $t_{max} = 5s$ ,

$$Z_{s2} \leq Z_{s2}(t_{max}) \rightarrow 60,633 \leq 653,409 \quad (5.133)$$

Podmínka je splněna, a tak ochrana proti nebezpečnému dotyku je zajištěna.

### 5.4 Ekonomická optimalizace průřezu kabelu Rx - M

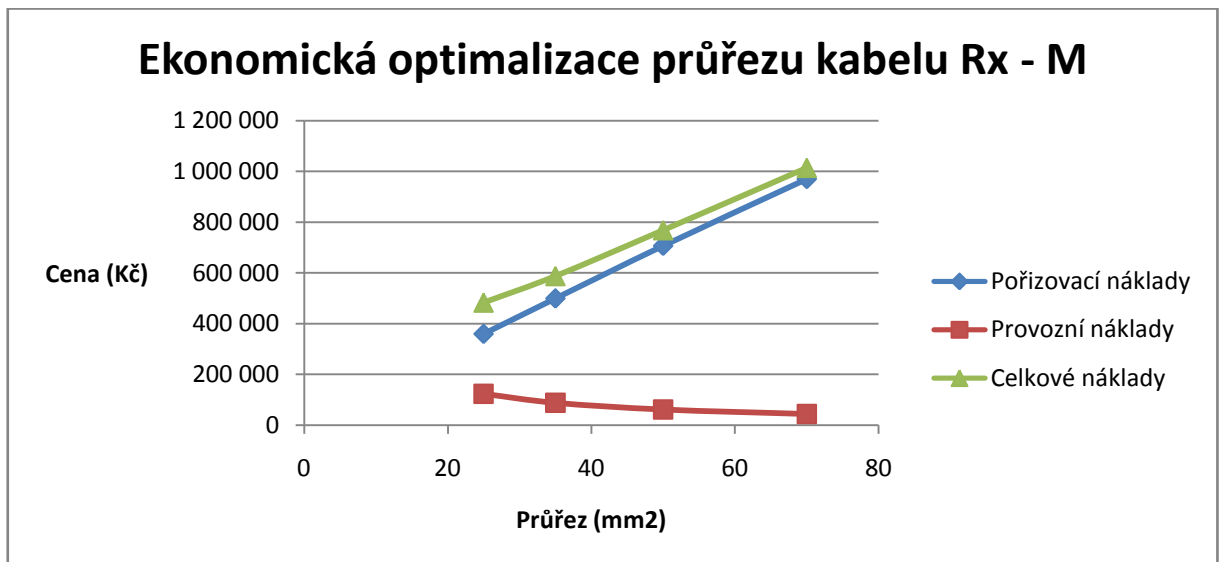
Praktická ekonomická optimalizace průřezu je provedena na kabelu spojující podružné rozvaděče s měniči. Pro ekonomickou optimalizaci využijeme softwaru Sichr od firmy OEZ.

Porovnáme celkem 4 kabely o různých průřezích. Prvním z nich bude samozřejmě námi navržený a použitý kabel 1-CYKY 4x25mm<sup>2</sup>, dalšími budou 1-CYKY 4x35mm<sup>2</sup>, 1-CYKY 4x50mm<sup>2</sup> a 1-CYKY 4x75mm<sup>2</sup>. Ceny kabelů jsou převzaty z ceníku kabelů od NKT Cables aktuálnímu k 1. 11. 2015 s dopočtem kovů platným 2.5.2016 - 6.5.2016. Výkupní cena je převzata z cenového rozhodnutí energetického regulačního úřadu ze dne 29. prosince 2015. Výkupní cena byla stanovena na 6033Kč/MWh pro výrobu nad 100kWh. Doba životnosti kabelu stejně jako doba plných ztrát je převzata z ilustračního příkladu v manuálu programu Sichr. Doba životnosti je tedy 20let a doba plných ztrát 500hodin/rok. Diskontní sazba je 5%. Celková délka vodičů byla dle schématu FVE stanovena na 1800 metrů.

Výsledné pořizovací náklady, provozní náklady a celkové náklady jednotlivých variant znázorňuje *Tab. 5.2 a Obr. 5.5*. Programem byl navrhnutý optimální průřez 14mm<sup>2</sup>, ale z výpočtu minimálního průřezu nelze pořídit kabel s nižším průměrem než 17,06mm<sup>2</sup> viz podmínka 5.109. Navržený a použitý kabel 1-CYKY 4x25mm<sup>2</sup> je nejvhodnější.

*Tab. 5.2 Pořizovací, provozní a celkové náklady jednotlivých kabelů*

Typ kabelu	1-CYKY 4x25mm <sup>2</sup>	1-CYKY 4x35mm <sup>2</sup>	1-CYKY 4x50mm <sup>2</sup>	1-CYKY 4x70mm <sup>2</sup>
Pořizovací náklady (Kč)	359 449	499 280	706 730	970 155
Provozní náklady (Kč)	123 729	88 335	61 846	44 261
Celkové náklady (Kč)	483 178	587 615	768 576	1 014 416



Obr. 5.5 Závislost pořizovacích, provozních a celkových nákladů na průřezu

## 6. Závěr

Cílem této práce bylo navrhnout na modelovém příkladě FVE kompletní rozvody včetně kompletního jištění. Součástí práce bylo také navrhnout přípojný kabel, kterým bude FVE připojena do DS 22kV. FVE bude mít výkon téměř 1,9MW. Bude tvořena celkem 8000 panely. Jeden řetězec bude tvořen 20 panely. Pole, které bude tvořeno čtyřmi řetězci, je zapojeno do měniče. Celkem 10 měničů je zapojeno do podružného rozvaděče, kterých bude 10. Ty jsou svedené do hlavního rozvaděče, kde jsou rovnoměrně rozdělené a jsou zapojené do dvou transformátorů 22/0,42kV každý o výkonu 1MVA přes které je vyvedený výkon do distribuční soustavy.

V první části jsou prezentovány základní pojmy, se kterými se můžeme ve fotovoltaice setkat. Uvedeny jsou zde základní vlastnosti a principy PV článků.

V další části jsou možnosti provozu FVE a rozebrány podmínky paralelní spolupráce výroby s DS, včetně nových aktuálních požadavků na řízení výroben k 1. 1. 2015 podle podnikových norem.

Ve čtvrté kapitole je řešena problematika jištění DC rozvodů. Jsou zde podrobně popsány podmínky správného návrhu pojistek, které by měly být speciálně pro fotovoltaiku. Spolu s DC rozvody je také nutné chránit rozvody za měničem, které jsou již střídavé. I zde je nutné propojovací vedení chránit proti zkratům a přetížení. Proto je vedení nutné správně dimenzovat na dovolenou proudovou zatížitelnost, úbytek napětí a na oteplení zkratovými proudy. Je vhodné také navrhovat průřez z ekonomického hlediska. Všechny tyto kontroly jsou podrobně popsány v této kapitole.

Poslední, praktickou částí je nejprve vhodný návrh stejnosměrných rozvodů a jejich správného jištění. Řešeno je to podle postupu uvedeného v předchozí kapitole. Další bod kapitoly řeší přípojný kabel a střídavé rozvody. Všechny kabely bylo nutné správně nadimenzovat, aby vyhovovaly všem požadavkům. Byl nutný také správný výběr jisticích prvků, které musely plnit správnou funkci. Samozřejmostí byla kontrola samotných jisticích prvků. V neposlední řadě byla nutnost kontroly nebezpečného dotyku, aby se zamezilo případným úrazům. Posledním bodem je praktický příklad ekonomické optimalizace průřezu. Ta byla použita na kabel spojující podružné rozvaděče s měniči. Bylo zjištěno, že námi použitý kabel je tou nejlepší variantou.

Celkově bylo dosaženo správných výsledků. Všechny kontroly a podmínky byly splněny a takovou to FVE by bylo možné bezpečně provozovat. Technické parametry jsou uvedeny v následující tabulce *Tab. 6.1*.

Tab. 6.1 Technické parametry FVE

<b>Stejnoseměrná část FVE</b>	
PV panel	Yingli Solar YL235P - 29b
DC kabel	CYKY 2x1,5mm <sup>2</sup>
Pojistky řetězce	PC10 12A gPV
Pojistky pole	P50V16 50A gR
Měnič	Refusol 020K
<b>Střídavá část FVE</b>	
Kabel Rx - M	1-CYKY 4x25mm <sup>2</sup>
Jistič kabelu Rx - M	BC160NT305-32-D, I <sub>N</sub> = 32A
Kabel HR - Rx	1-CYKY 3x240+120mm <sup>2</sup>
Jistič kabelu HR - Rx	Modeion BH630NE305, I <sub>N</sub> = 290A
Jistič sekundární strany transformátorů T1	Modeion BL1600S, I <sub>N</sub> = 1600A
Transformátor T1 22/0,42kV	S <sub>T1</sub> = 1MVA, u <sub>k</sub> % = 6%, ΔP <sub>k</sub> = 10,5kW
Pojistky VN	Typ PM45 I <sub>N</sub> = 50A
Přípojný kabel	22-CXEKVCEY 1x35/16mm <sup>2</sup>

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] MURTINGER, Karel, Jiří BERANOVSKÝ a Milan TOMEŠ. *Fotovoltaika, elektřina ze slunce*. 1. vyd. Brno: ERA, 2007, vii, 81 s. 21. století. ISBN 978-80-7366-100-7.
- [2] HENZE, Andreas a Werner HILLEBRAND. *Elektrický proud ze slunce: fotovoltaika v praxi : technika, přehled trhu, návody ke stavbě*. 1. české vyd. Ostrava: HEL, 2000, 136 s. ISBN 80-86167-12-7.
- [3] HASELHUHN, Ralf. *Fotovoltaika: budovy jako zdroj proudu*. 1. české vyd. Ostrava: HEL, 2011, 176 s. ISBN 978-80-86167-33-6.
- [4] *Stručná historie fotovoltaiky - TZB-info*. [Http://oze.tzb-info.cz/](http://oze.tzb-info.cz/) [online]. 2014 [cit. 2015-11-05]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/11652-strucna-historie-fotovoltaiky>
- [5] SOLARPOWER EUROPE. *Global Market Outlook For Solar Power / 2015 - 2019* [online]. [cit. 2015-11-05]. ISBN 9789082228410. Dostupné z: [http://helapco.gr/pdf/Global\\_Market\\_Outlook\\_2015\\_-2019\\_lr\\_v23.pdf](http://helapco.gr/pdf/Global_Market_Outlook_2015_-2019_lr_v23.pdf)
- [6] *Fotovoltaika v České republice v roce 2014*. [Oze.tzb-info.cz](http://oze.tzb-info.cz) [online]. 2014 [cit. 2015-11-06]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/12162-fotovoltaika-v-ceske-republice-v-roce-2014>
- [7] *Fotovoltaické elektrárny. Solární elektrárny SunnyWatt | Energeticky úsporné řešení a energetická soběstačnost* [online]. Praha: SunnyWatt, 2015 [cit. 2016-02-15]. Dostupné z: <http://www.solarnielektrarny.cz/energetika/fotovoltaicke-elektrarny>
- [8] *Pravidla provozování distribuční soustavy: Příloha 4 - Pravidla pro paralelní provoz zdrojů se sítí provozovatele distribuční soustavy. Provozovatelé distribučních soustav*, 2011.
- [9] *SolarTechnika.sk : Odpínání a jištění DC rozvodů fotovoltaických elektráren*. [SolarTechnika.sk](http://www.solarteknika.sk) [online]. Praha: Techpark, 2013 [cit. 2016-03-08]. Dostupné z: <http://www.solarteknika.sk/solarteknika-22010/odpinani-a-jisteni-dc-rozvodu-fotovoltaickych-elektraren.html>
- [10] *Jištění fotovoltaických zdrojů*. FALTUS, Ivo. *Příručka elektrotechnika - Jisticí přístroje II, firemní materiály OEZ*. Letohrad: OEZ, 2012, s. 57-72.
- [11] *Jištění fotovoltaických zdrojů*. FALTUS, Ivo. *Příručka elektrotechnika - Jisticí přístroje I, firemní materiály OEZ*. Letohrad: OEZ, 2011.
- [12] *Přístroje pro fotovoltaiku. FV1-2012-C, firemní materiály OEZ*. OEZ, 2012

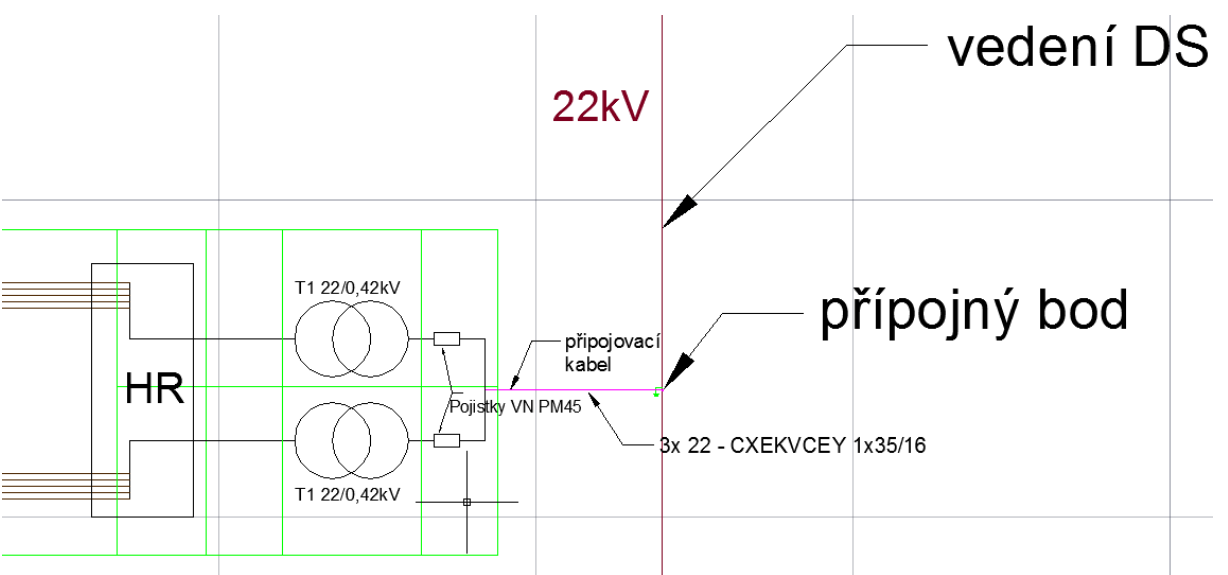
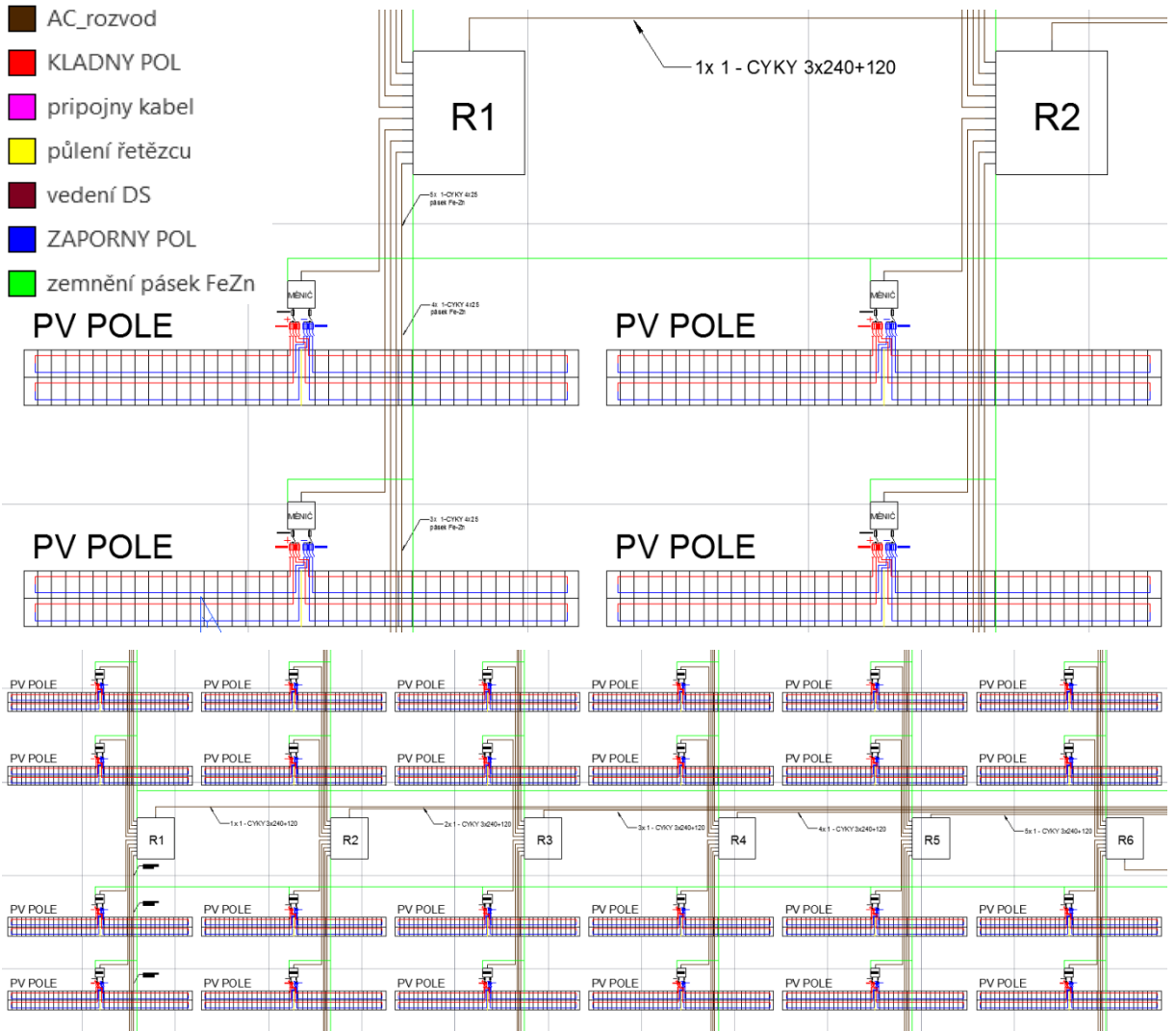
- [13] TESAŘOVÁ, Miloslava. *Vypocet Ik* [online]. 2015 [cit. 2016-04-24]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~tesarova/PE/Soubory/Vypocet%20Ik.pdf>
- [14] *Katalog kabelu NKT* [Katalog-kabelu-NKT.pdf]. NKT cables, 2009 [cit. 2016-04-24]
- [15] *Katalog kabelu VN Draka* [Katalog-kabelu-VN-Draka.pdf]. Draka, 2010 [cit. 2016-04-24].
- [16] *Přehled sortimentu - OEZ: PS01-2016-CZ* [online]. OEZ, 2016 [cit. 2016-04-24]. Dostupné z: <http://www.oez.cz/ke-stazeni/katalogy>
- [17] TESAŘOVÁ, Miloslava. *Normy dimenzovani vodicu - zkraceno* [Normy\_dimenzovani\_vodicu - zkraceno.pdf]. 2015 [cit. 2016-04-24].
- [18] *Parametry vedeni a kabelu* [parametry\_vedeni\_a\_kabelu.xls]. 2004 [cit. 2016-04-24].
- [19] *PNE 33 3430-8-1. Požadavky pro připojení generátorů nad 16 A na fázi do distribučních sítí - Část 8-1: Sítě nn. České Budějovice*, 2015.
- [20] *PNE 33 3430-8-2. Požadavky pro připojení do distribučních sítí - Část 8-2: Sítě vn. České Budějovice*, 2015.
- [21] *Produkty OEZ, OEZ. OEZ* [online]. Letohrad: OEZ, 2016 [cit. 2016-05-01]. Dostupné z: <http://www.oez.cz/produkty>
- [22] *Energetický regulační VĚŠTNÍK* [online]. Jihlava: Energetický regulační úřad, 2015, 15(10) [cit. 2016-05-01]. Dostupné z: [http://www.eru.cz/documents/10540/462898/151229\\_CR\\_POZE\\_9\\_2015.pdf/e8c97a46-2870-47c6-9f11-8f4a97145ab1](http://www.eru.cz/documents/10540/462898/151229_CR_POZE_9_2015.pdf/e8c97a46-2870-47c6-9f11-8f4a97145ab1)
- [23] *Ceník vodičů, kabelů a příslušenství platný od 1. listopadu 2015*. In: *Kabely, vodiče - nkt cables* [online]. Kladno, 2015 [cit. 2016-05-01]. Dostupné z: <http://www.nktcables.com/cz/support/download/price-lists/>
- [24] MOC, Miroslav. *Návrh napájení zemědělského objektu. Plzeň, 2014. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektroenergetiky a ekologie. Vedoucí práce Miloslava Tesařová.*

# Přílohy

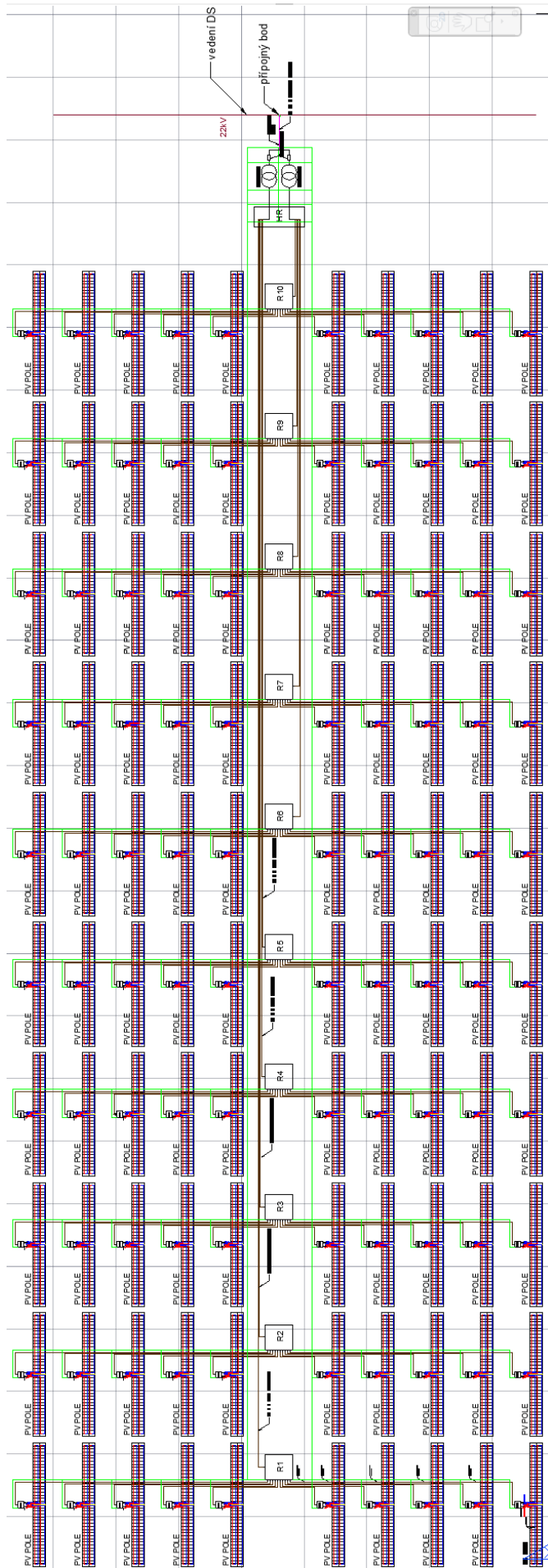
## Příloha A - Náskres FVE

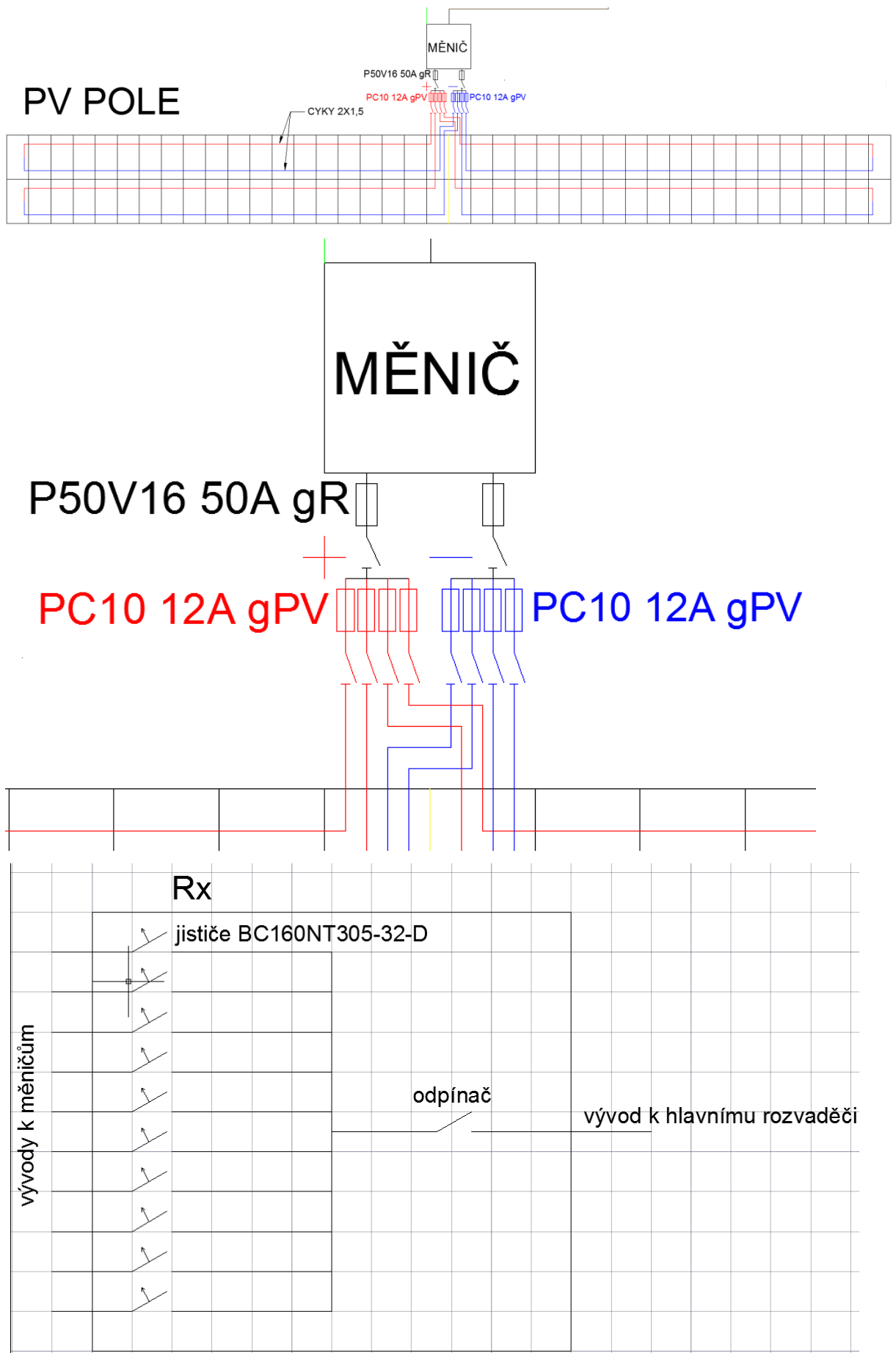
### Legenda:

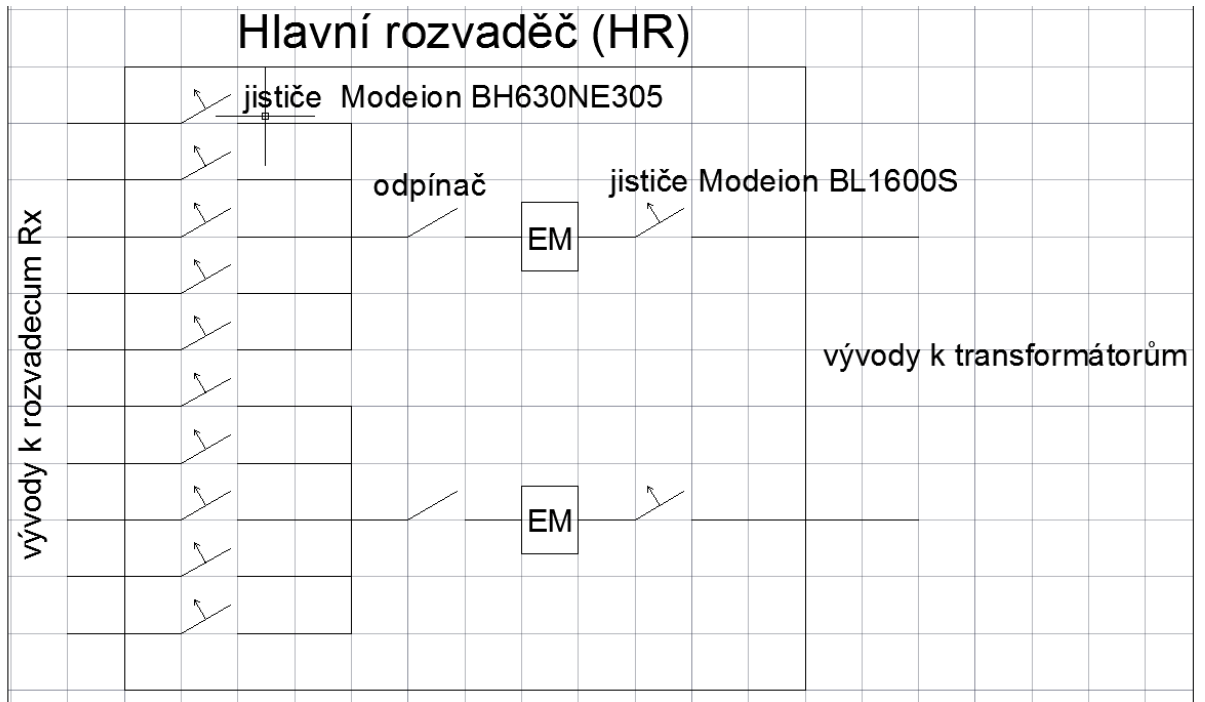
- AC\_rozvod
- KLADNY POL
- pripojny kabel
- půlení řetězcu
- vedení DS
- ZAPORNY POL
- zemnění pásek FeZn



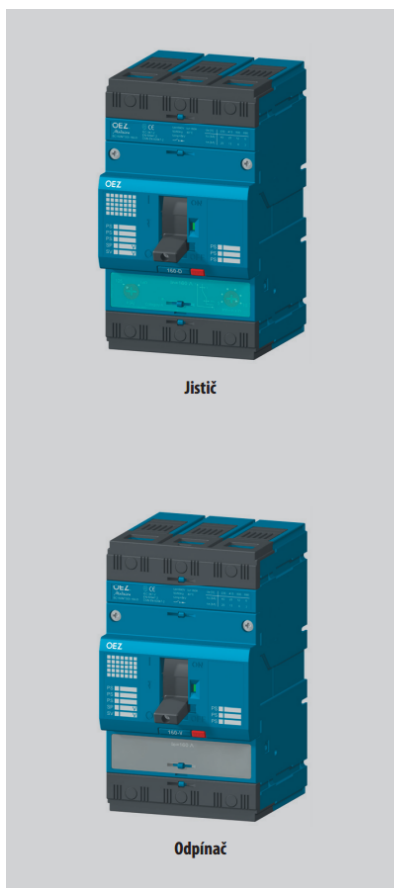




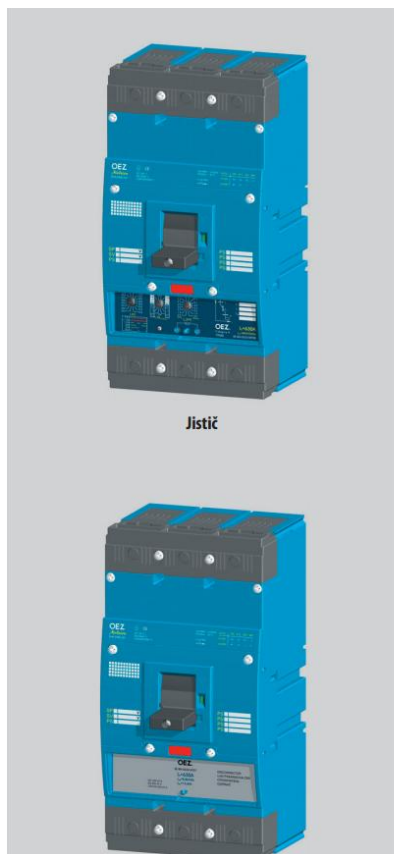




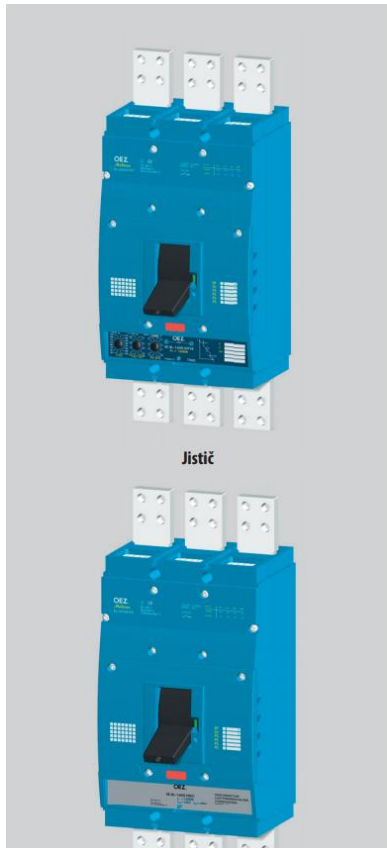
## Příloha B - Parametry použitých jističů







Parametry	JISTIČ		ODPÍNAČ
	BC160NT..		BC160NT...-V
Typ	NORMAL		
Rozměry A x B x C + D (3P/4P provedení)	75/100x130x70+23 mm		75/100x130x70+23 mm
Hmotnost (3P/4P provedení)	1/1,3 kg		1/1,3 kg
Normy	ČSN EN 60947-2 EN 60947-2, IEC 60947-2		ČSN EN 60947-3 EN 60947-3, IEC 60947-3
Certifikační značky	CE (S)		CE (S)
Počet pólů	3, 4		3, 4
Jmenovitý proud	$I_n$	16 ÷ 160 A <sup>2)</sup>	-
Jmenovitý trvalý proud	$I_n$	16 ÷ 160 A <sup>2)</sup>	160 A
Jmenovitý pracovní proud	$I_e$	-	160 A
Jmenovité pracovní napětí	$U_e$	max. 690 V a.c. max. 250 V d.c. (3P) max. 440 V d.c. (4P)	max. 690 V a.c. max. 250 V d.c. (3P) max. 440 V d.c. (4P)
Jmenovitý kmitočet	$f_n$	50/60 Hz	50/60 Hz
Jmenovité impulzní výdržné napětí	$U_{imp}$	8 kV	8 kV
Jmenovité izolační napětí	$U_i$	690 V	690 V
Kategorie užití (selektivita)		A	-
Kategorie užití (režim spínání)		AC-3 (16 ÷ 100 A) AC-2 (125 ÷ 160 A) DC-22A	AC-23 A DC-22A
Jmenovitý krátkodobý výdržný proud	$I_{cw} / t$	-	2 kA / 1 s
Jmenovitá mezní zkratová vypínací schopnost (efektivní hodnota) <sup>1)</sup>	$I_{cs} / U_e$	6 kA / 690 V a.c. 12 kA / 500 V a.c. 25 kA / 415 V a.c. 40 kA / 230 V a.c. 25 kA / 250 V d.c. $\tau = \text{max. } 15 \text{ ms}$ (3P) 20 kA / 440 V d.c. $\tau = \text{max. } 15 \text{ ms}$ (4P)	-
Doba při vypnutí $I_{cs}$		7 ms	-
Jmenovitá provozní zkratová vypínací schopnost (efektivní hodnota)	$I_{cs} / U_e$	3 kA / 690 V a.c. 6 kA / 500 V a.c. 13 kA / 415 V a.c. 20 kA / 230 V a.c. 13 kA / 250 V d.c. $\tau = \text{max. } 10 \text{ ms}$ (3P) 13 kA / 440 V d.c. $\tau = \text{max. } 10 \text{ ms}$ (4P)	-
Jmenovitá zkratová zapínací schopnost (vrcholová hodnota)	$I_{cm} / U_e$	52 kA / 415 V a.c.	2,8 kA / 415 V a.c.



Parametry	JISTIČ		ODPÍNAČ
	BH630N, BH630S		
Typ	NORMAL		
Rozměry A x B x C + D (3P/4P provedení)	140/185 x 275 x 105 + 49 mm		140/185 x 275 x 105 + 49 mm
Hmotnost (3P/4P provedení)	5,4/7,4 kg		5,4 kg
Normy	ČSN EN 60947-2 EN 60947-2 IEC 60947-2		ČSN EN 60947-3 EN 60947-3 IEC 60947-3
Certifikační značky	CE (S) (P) (M)		
Počet pólů	3, 4		3, 4
Jmenovitý proud	$I_n$	250, 315, 400, 500, 630 A	-
Jmenovitý trvalý proud	$I_n$	630 A	630 A
Jmenovitý pracovní proud	$I_e$	-	630 A
Jmenovité pracovní napětí	$U_e$	max. 690 V a.c. -	max. 690 V a.c. max. 440 V d.c.
Jmenovitý kmitočet	$f_n$	50/60 Hz	50/60 Hz
Jmenovité impulzní výdržné napětí	$U_{imp}$	8 kV	8 kV
Jmenovité izolační napětí	$U_i$	690 V	690 V
Kategorie užití (selektivita)		A	-
Kategorie užití (režim spínání)		-	AC-23B DC-23B
Jmenovitý krátkodobý výdržný proud při $U_e = 690 \text{ V a.c.}$	$I_{cw} / t$	8 kA/50 ms, 7 kA/300 ms, 6,5 kA/1 s	7,5 kA/5 s
Rada		NORMAL BH630N SUPERIOR BH630S	$U_e$ -
Jmenovitá mezní zkratová vypínací schopnost (efektivní hodnota) <sup>1)</sup>	$I_{cs}$	60 kA 36 kA 20 kA 15 kA	100 kA 65 kA 35 kA 20 kA 230 V a.c. 415 V a.c. 500 V a.c. 690 V a.c.
Jmenovitá provozní zkratová vypínací schopnost (efektivní hodnota)	$I_{cs}$	40 kA 18 kA 10 kA 8 kA	75 kA 36 kA 20 kA 15 kA 230 V a.c. 415 V a.c. 500 V a.c. 690 V a.c.
Jmenovitá zkratová zapínací schopnost (vrcholová hodnota)	$I_{cm} / U_e$	75 kA -	140 kA -
Doba vypnutí při $I_{cs}$		20 ms	-



**Parametry**

		JISTIČE	ODPÍNAČE
<b>Typ</b>		<b>BL1600S</b>	
<b>Řada</b>		SUPERIOR	
<b>Rozměry A x B x C + D</b>		210 x 350 x 135 + 63 mm	210 x 350 x 135 + 63 mm
<b>Hmotnost</b>		22 kg	22 kg
<b>Normy</b>		ČSN EN 60947-2 EN 60947-2 IEC 60947-2	ČSN EN 60947-3 EN 60947-3 IEC 60947-3
<b>Certifikační značky</b>		   	
<b>Počet polů</b>		3	3
<b>Jmenovitý proud</b>	$I_n$	630, 1 000, 1 250, 1 600 A	-
<b>Jmenovitý trvalý proud</b>	$I_u$	1 600 A	1 600 A
<b>Jmenovitý pracovní proud</b>	$I_c$	-	1 600 A
<b>Jmenovité pracovní napětí</b>	$U_e$	max. 690 V a.c. <sup>2)</sup>	max. 690 V a.c. <sup>2)</sup> max. 440 V d.c.
<b>Jmenovitý kmitočet</b>	$f_n$	50/60 Hz	50/60 Hz
<b>Jmenovité impulzní výdržné napětí</b>	$U_{imp}$	8 kV	8 kV
<b>Jmenovité izolační napětí</b>	$U_i$	690 V	690 V
<b>Kategorie užití (selektivita)</b>		A, B	-
<b>Kategorie užití (režim spínání)</b>		-	AC-23B DC-23B
<b>Jmenovitý krátkodobý výdržný proud při <math>U_e = 690</math> V a.c.</b>	$I_{cw} / t$	20 kA/1 s	20 kA/1 s
<b>Jmenovitá mezní zkratová vypínací schopnost (efektivní hodnota)<sup>1)</sup></b>	$I_{cs} / U_e$	85 kA/230 V a.c. 65 kA/415 V a.c. 45 kA/500 V a.c. 20 kA/690 V a.c.	-
<b>Doba vypnutí při <math>I_{cs}</math></b>		30 ms	-
<b>Jmenovitá provozní zkratová vypínací schopnost (efektivní hodnota)</b>	$I_{cs} / U_e$	45 kA/230 V a.c. 36 kA/415 V a.c. 30 kA/500 V a.c. 20 kA/690 V a.c.	-
<b>Jmenovitá zkratová zapínací schopnost</b>	$I_{cm} / U_e$	140 kA/415 V a.c.	40 kA/415 V a.c. 40 kA/440 V d.c.

## Příloha C - Ekonomická optimalizace průřezu

Porovnání jednotlivých variant ekonomické optimalizace průřezu kabelů 1L6

Varianta	1	2	3	4
Kabel	1-CYKY4x25	1-CYKY4x35	1-CYKY4x50	1-CYKY4x70
Cena vedení [Kč / m]	199,69	277,37	392,62	538,97
Cena elektrické energie [Kč / kWh]	6,03	6,03	6,03	6,03
Ekonomická životnost vedení [roků]	20	20	20	20
Doba plných ztrát [hodin / rok]	500	500	500	500
Plné ztráty [kW]	3,293	2,351	1,646	1,178
Diskontní sazba [%]	5	5	5	5
Roční nárůst zatížení [% / rok]	0	0	0	0
Roční nárůst ceny elektrické energie [% / rok]	0	0	0	0
Pořizovací náklady [Kč]	359 449	499 280	706 730	970 155
Provozní náklady [Kč]	123 729	88 335	61 846	44 261
Celkové náklady [Kč]	483 178	587 615	768 576	1 014 416