

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Katedra elektroenergetiky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Zkratové poměry na energetickém zdroji v Plané nad Lužnicí

Autor práce: **Bc. Martin Novotný**
Vedoucí práce: **Doc. Ing. Miloslava Tesařová Ph.D.**

2023

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2022/2023

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Martin NOVOTNÝ**
Osobní číslo: **E21N0011P**
Studijní program: **N0713A060013 Výkonové systémy a elektroenergetika**
Specializace: **Elektroenergetika**
Téma práce: **Zkratové poměry na energetickém zdroji v Plané nad Lužnicí**
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky**

Zásady pro vypracování

1. Popište současný stav provozu daného energetického zdroje (zapojení zdroje do sítě, vnitřní zapojení, použité technologie, provoz výrobních modulů) a plánované změny.
2. Zvolte vhodný nástroj pro stanovení zkratových poměrů podle požadavků provozovatele zdroje.
3. Stanovte náhradní schéma pro výpočet zkratových poměrů, vytvořte funkční model sítě pro výpočet zkratu na různých napěťových úrovních a při různých příspěvcích zkratového proudu (změna příspěvku ze sítě, změna počtu zdrojů apod.).
4. Proveďte výpočet minimálního a maximálního zkratového příspěvku na různých napěťových úrovních.
5. Posuďte vliv změny napájení sítě 110 kV z přenosové soustavy (změna z 220 kV na 400kV –nová transformovna) na rozvodnu 10,5 kV a provoz zdroje.


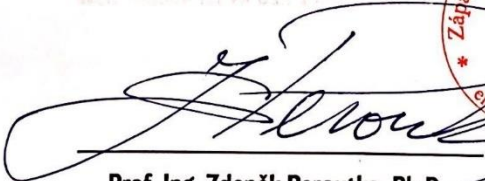
Rozsah diplomové práce: **40 – 60**
Rozsah grafických prací:
Forma zpracování diplomové práce: **elektronická**


Seznam doporučené literatury:

1. ČSN EN 60909-0 Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách – Část 0: Výpočet proudů, ed.2, 2016.
2. Mertlová, J., Noháčová, L.: Elektrické stanice a vedení, ZČU v Plzni, 2008.

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

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



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


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

V Plzni dne 7. října 2022

Abstrakt

Teoretická část této práce představuje teplárnu C-Energy Planá s.r.o. a jednotlivé technologie, které se v teplárně využívají. Dále je zde uvedena problematika modernizace elektrické sítě ČR a s ní spojená přestavba přenosového vedení, do kterého je vyvedena teplárna Planá. V posledním úseku teoretické části je uveden přehled softwarů pro výpočet zkratových poměrů v elektrických sítích.

Praktická část této diplomové práce se zaměřuje na modelování elektrické sítě teplárny v příslušných softwarech. Následně je proveden výpočet zkratových proudů na jednotlivých napěťových hladinách pro současný stav provozu přenosové sítě a pro výhledový stav provozu přenosové sítě. Poté jsou pro možné kombinace zapojení generátorů porovnány výsledky zkratových proudů s výdržnými zkratovými proudy rozvodny 10,5 kV. Závěrem je provedeno zhodnocení vlivu přestavby vedení na rozvodnu 10,5 kV.

Klíčová slova

Zkratový proud, zkratová odolnost, výpočetní software, trojvintuřový transformátor

Abstract

The theoretical part of this thesis presents the C-Energy Planá s.r.o. heating plant and the individual technologies used in the heating plant. Furthermore, the problems of the modernization of the Czech power grid and the related reconstruction of the transmission line to which the Planá heating plant is connected are presented. In the last section of the theoretical part, an overview of software for calculating short-circuit ratios in electrical networks is given.

The practical part of this thesis focuses on modelling the electrical network of the heating plant in the relevant softwares. Subsequently, the calculation of short-circuit currents at individual voltage levels is performed for the current state of operation of the transmission network and for the future state of operation of the transmission network. Then, for possible combinations of generator connections, the short-circuit current results are compared with the sustained short-circuit currents of the 10.5 kV substation. Finally, an assessment of the impact of the line conversion on the 10.5 kV substation is made.

Key Words

Short circuit current, short circuit endurance, computational software, three-winding transformer

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucí diplomové práce Doc. Ing. Miloslavě Tesařové, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

Úvod	- 1 -
1 Současný stav provozu teplárny C-Energy Planá	- 2 -
1.1 Použité technologie	- 2 -
1.1.1 Turbogenerátor	- 2 -
1.1.2 Plynové motorgenerátory Rolls-Royce	- 3 -
1.1.3 Fotovoltaická elektrárna	- 3 -
1.1.4 Bateriové úložiště Siemens Siestorage	- 3 -
1.2 Současné zapojení zdroje do přenosové sítě	- 4 -
1.3 Plánované změny v PS	- 5 -
2 Volba vhodného softwaru pro stanovení zkratových poměrů	- 8 -
2.1 Software PSP-UFU	- 8 -
2.2 Software Pandapower	- 8 -
2.3 Další softwary	- 9 -
3 Model sítě pro výpočet zkratových poměrů	- 10 -
3.1 Náhradní schéma	- 11 -
3.2 Stanovení vstupních parametrů modelu	- 13 -
4 Porovnání zvolených softwarů z hlediska přesnosti výpočtu a praktického využití	- 24 -
4.1 Ruční výpočet zkratu	- 24 -
4.2 Výpočet zkratu pomocí programu Pandapower	- 35 -
4.3 Výpočet zkratu pomocí programu PSP-UFU	- 37 -
4.4 Vyhodnocení výsledných zkratových proudů pro srovnávací zapojení	- 43 -
5 Vliv změny napájení sítě na rozvodnu 10,5 kV	- 45 -
5.1 Parametry rozvodny 10,5 kV	- 45 -
5.2 Porovnání výsledných zkratových proudů pro různá zapojení	- 46 -
5.3 Vyhodnocení výsledků	- 58 -
5.3.1 Kontrola na dynamické účinky zkratových proudů	- 58 -
5.3.2 Kontrola na tepelné účinky zkratových proudů	- 59 -
5.3.3 Kontrola na vypínací schopnosti vypínačů	- 59 -
5.3.4 Doporučení pro provoz zdroje	- 60 -

Zhodnocení a závěr.....	- 62 -
Literatura	- 63 -
Seznam obrázků.....	- 65 -
Seznam tabulek.....	- 66 -
Přílohy	I

Seznam symbolů a zkratk

Značka	Popisek	Jednotka
c_{max}	Součinitel napětí pro výpočet maximálního zkratového proudu	-
I_b	Souměrný vypínací proud	kA
$I_{k_{max}}$	Maximální ustálený zkratový proud	kA
I''_{k3f}	Počáteční rázový zkratový proud (3fázový)	kA
$I''_{k3f_{max}}$	Počáteční rázový zkratový proud (3fázový, maximální)	kA
$I''_{k3f_{min}}$	Počáteční rázový zkratový proud (3fázový, maximální)	kA
I_{nR}	Jmenovitý proud reaktoru	A
i_p	Nárazový zkratový proud	kA
I_{rTG}	Jmenovitý proud generátoru TG	kA
I_{rPG6}	Jmenovitý proud generátoru PG6	kA
I_{th}	Ekvivalentní oteplovací zkratový proud	kA
$I_{th;1}$	Ekvivalentní oteplovací zkratový proud při referenční hodnotě $T_k = 1 \text{ s}$	kA
I_{vyp}	Jmenovitá vypínací schopnost	kA
K_G	Korekční součinitel pro impedance generátoru	-
K_{Txy}	Korekční součinitel pro impedance transformátoru	-
l	Délka kabelu	km
m	Součinitel pro tepelné účinky stejnosměrné složky	-
n	Součinitel pro tepelné účinky střídavé složky	-
n_l	Počet vodičů	-
p	Převod transformátoru	-
P_G	Jmenovitý činný výkon generátoru	MW
P_{mech}	Mechanický výkon	MW
ΔP_{k12}	Ztráty nakrátko (strana transformátoru VN-MN)	kW
ΔP_{k13}	Ztráty nakrátko (strana transformátoru VN-NN)	kW
ΔP_{k23}	Ztráty nakrátko (strana transformátoru MN-NN)	kW
r_g	Poměrná činná složka impedance generátoru	-
R_g	Činná složka impedance generátoru	Ω

$R_{g20\text{ }^\circ\text{C}}$	Činná složka impedance generátoru při 20 °C	Ω
$R_{g75\text{ }^\circ\text{C}}$	Činná složka impedance generátoru při 75 °C	Ω
R_l	Odpor vodiče	Ω/km
r_R	Poměrný odpor reaktoru	-
R_R	Odpor reaktoru	Ω
R_v	Odpor vodiče	Ω
$R_{výs.}$	Výsledný odpor	Ω
S''_{k3f}	Počáteční rázový zkratový výkon (3fázový)	MVA
S_n	Jmenovitý zdánlivý výkon	MVA
S_{nR}	Jmenovitý zdánlivý výkon reaktoru	MVA
S_{n25MVA}	Jmenovitý výkon (ref. hodnota 25 MVA)	MVA
S_{n65MVA}	Jmenovitý výkon (ref. hodnota 65 MVA)	MVA
$S_{nT,VN}$	Jmenovitý výkon transformátoru (VN)	MVA
$S_{nT,SN}$	Jmenovitý výkon transformátoru (SN)	MVA
$S_{nT,NN}$	Jmenovitý výkon transformátoru (NN)	MVA
U_n	Jmenovité napětí	V
U_{nG}	Jmenovité napětí generátoru	V
U_{nR}	Jmenovité napětí reaktoru	V
$U_{nT,VN}$	Jmenovité napětí transformátoru (VN)	V
$U_{nT,SN}$	Jmenovité napětí transformátoru (SN)	V
$U_{nT,NN}$	Jmenovité napětí transformátoru (NN)	V
$u_{k12\%}$	Poměrné napětí nakrátko (strana VN-MN)	%
$u_{k23\%}$	Poměrné napětí nakrátko (strana SN-NN)	%
$u_{k13\%}$	Poměrné napětí nakrátko (strana VN-NN)	%
$u_{kr12\%}$	Reálná část napětí nakrátko (strana VN-MN)	%
$u_{kr13\%}$	Reálná část napětí nakrátko (strana VN-NN)	%
$u_{kr23\%}$	Reálná část napětí nakrátko (strana MN-NN)	%
X_l	Reaktance vodiče	Ω/km
X_v	Reaktance vodiče	Ω
x_{dsat}	Poměrná nasycená reaktance	-
x''_d	Poměrná rázová reaktance generátoru	-
$x''_d\%$	Poměrná rázová reaktance generátoru	%

x_R	Poměrná reaktance reaktoru	-
$x_{R\%}$	Poměrná reaktance reaktoru	%
Z_{rg}	Vztažná impedance generátoru	Ω
Z_{rR}	Vztažná impedance reaktoru	Ω
η	Účinnost	-

Úvod

V rámci modernizace přenosové soustavy České republiky a tím i posílení přenosové kapacity soustavy, dochází a bude docházet po celé republice k přestavbě určitých elektrických rozvodů a částí elektrických vedení. Přestavba se týká i vedení 220 kV mezi rozvodnou Milín a Sokolnice, které bude nahrazeno vedením 400 kV mezi rozvodnou Kočín a Mírovka. Právě na tato vedení je připojena teplárna C-Energy Planá s.r.o.

Změna napěťové úrovně vedení sebou přináší změnu zkratového výkonu soustavy, a tedy i změnu zkratových poměrů v celé teplárně. Pokud by nastala v elektrické soustavě teplárny porucha v podobě zkratu, protéká zkratovým obvodem zkratový proud. Znalost zkratového proudu je důležitá z hlediska dimenzování jednotlivých komponent elektrické sítě a z hlediska nastavování ochran.

Z počátku diplomové práce stručně popisují technologie používané v teplárně. Dále uvádím plánované změny v přenosové soustavě a současné a budoucí zapojení teplárny do elektrizační soustavy.

Další část práce je věnována přehledu vhodných softwarů pro výpočet zkratových poměrů v elektrických sítích a detailnější přiblížení dvou vybraných softwarů a parametrizace komponentů sítě pro tyto softwary.

Hlavním cílem práce je pak namodelovat ve vybraných softwarech elektrickou síť teplárny a určit zkratové proudy v jednotlivých částech sítě na různých napěťových hladinách. Nakonec porovnat tyto hodnoty před a po přestavbě vedení a zhodnotit vliv této změny na rozvodnu 10,5 kV a na provoz zdroje. Případně, pokud nebude výdržnost rozvodny 10,5 kV vyhovovat pro současná zapojení generátorů, navrhnout vyhovující zapojení generátorů.

1 Současný stav provozu teplárny C-Energy Planá

Teplárna C-Energy Planá s.r.o. se nachází v Plané nad Lužnicí poblíž okresního města Tábor a řadí se mezi nejmodernější zdroje ve střední Evropě sloužící k vysoce účinné kombinované výrobě elektrické a tepelné energie. Instalovaný výkon teplárny je více než 85 MWe. Podílí se na energetické bezpečnosti v ČR, poskytuje systémové služby energetické soustavě a dodává energie do Tábora a okolí. [1]

Tabulka 1 Souhrn zdrojů elektrické energie

Zdroj	Výkon (kW)
Turbogenerátor	26000
Motorgenerátor	9250
Motorgenerátor	9250
Motorgenerátor	9250
Motorgenerátor	9250
Motorgenerátor	11500
Motorgenerátor	11500
Fotovoltaická elektrárna	520
Celkem	86520

1.1 Použité technologie

Teplárna se od roku 2012 značně zmodernizovala a stala se tak významným energetickým zdrojem pro okres Tábor. Touto modernizací technologií a dbáním na ekologii se škodlivé emise celého zdroje snížily o 90 %. Navíc jako první v České republice v srpnu roku 2022 zcela přešla ze spalování uhlí na spalování odpadní dřevní biomasy. To vedlo k dalšímu výraznému snížení škodlivých emisí zdroje o 91 %. [1]

1.1.1 Turbogenerátor

V rámci modernizace a ekologizace zdroje C-Energy Planá došlo k výměně a rekonstrukci kotle, turbíny i generátoru. Turbogenerátor disponuje výkonem o hodnotě 50,7 MW. Jako palivo do kotle se již využívá pouze biomasa.

1.1.2 Plynové motorgenerátory Rolls-Royce

V rámci modernizace a rekonstrukce došlo v areálu teplárny k vybudování nejprve čtyř plynových kogeneračních jednotek Rolls-Royce, které byly dokončeny a uvedeny do provozu již v roce 2014. Jedná se o plynové pístové motory s generátory. Každé jednotlivé soustrojí váží 133 tun a disponuje elektrickým výkonem o hodnotě 9,25 MW.

Poté v roce 2019 došlo k instalaci dalších dvou podobných plynových kogeneračních jednotek Rolls-Royce. V době, kdy byly instalovány se v celosvětovém měřítku jednalo o první instalaci největších motorgenerátorů tohoto typu. Každá jednotka dosahuje elektrického výkonu 11,5 MW. Při výrobě pouze elektrické energie se jejich účinnost blíží 47 %. Při společné výrobě elektrické a tepelné energie dosahují účinnosti přes 84 %.

Dohromady tedy disponuje teplárna celkem šesti plynovými kogeneračními jednotkami. V České republice se jedná o největší energetický zdroj takového typu, co se počtu i výkonů motorů týká. Pomocí motorů se zvyšuje stabilita přenosové sítě tím, že dokáží vyrovnávat kolísání elektrické energie v síti. Dokážou se dostat z nulového výkonu na maximální výkon a poté připnout do sítě VN do pěti minut. V nejhorším možném případě můžou zabránit black-outu. [2]

1.1.3 Fotovoltaická elektrárna

Do vlastnictví výrobního bloku C-Energy Planá patří také fotovoltaická elektrárna, která je vybudována nedaleko samotné teplárny. Celá fotovoltaická elektrárna má instalovaný výkon 520 kW a skládá se celkem z 1600 monokrystalických solárních panelů a 11 měničů. Na území fotovoltaické elektrárny se nachází také transformátor o parametrech 0,4 / 6,3 kV sloužící k vyvedení výkonu.

Celá FVE je zapojena do lokální distribuční soustavy teplárny a slouží k pokrývání vlastní spotřeby teplárny. Tímto dochází k úspoře paliva, které by bylo využito na pokrývání vlastní spotřeby. V případě přebytku elektrické energie lze tuto energii uložit do akumulčních baterií Siestorage.

1.1.4 Bateriové úložiště Siemens Siestorage

Baterie byla v teplárně instalována v roce 2019. V tento rok se jednalo o největší bateriové úložiště instalované v České republice. Bateriové zařízení má výkon 4 MW a minimální kapacitu 2,5 MWh po dobu 10 let, pro teplárnu však není důležitá kapacita nebo

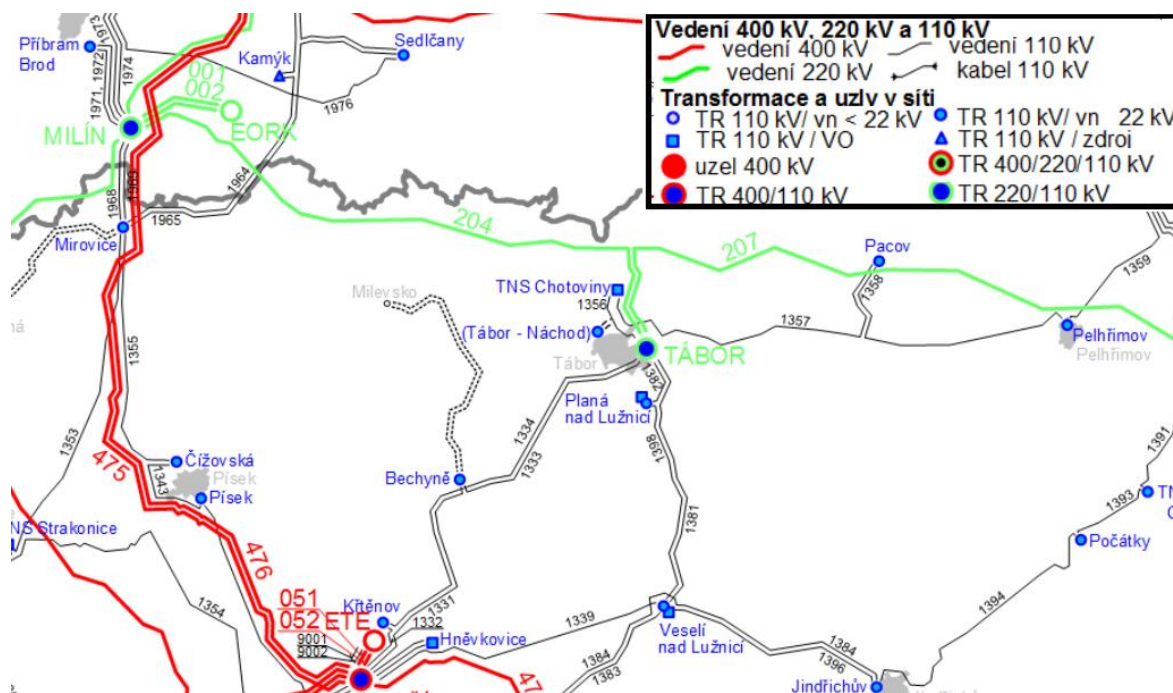
velikost baterie, ale důležité jsou funkce, které dokáže zastávat. Celé zařízení obsahuje řídicí systém (ten je napojený na dosavadní řídicí systém teplárny C-Energy), Li-Ion bateriové články, rozvaděče, střídače/měniče, transformátory, napájení vlastní spotřeby a další pomocné systémy. Vše je pak uloženo ve třech kontejnerech ve venkovních prostorách teplárny.

Baterie je napojena na fotovoltaickou elektrárnu, která je postavena poblíž teplárny, ale také na stávající tepelný zdroj. V tomto zapojení právě spočívá unikátnost této aplikace. Jiné bateriové zařízení instalované po celém světě musí mít napájení z venkovní sítě a nedisponuje tak dalšími důležitými funkcemi. Zařízení celkově zlepšuje kvalitu elektrické energie. Je schopno, ostatně jako ostatní zdroje, poskytovat služby stabilizace výkonu, dále podstatně zvyšuje bezpečnost dodávky elektrické energie pro své odběratele v místní distribuční soustavě, umožňuje pokrývání špiček spotřeby a zvyšuje funkcionalitu celé elektrárny, což vše vede k možnosti zajištění příznivých cen energie.

Další významnou funkcí je schopnost zařízení umožnit první napětí zdroji pro start ze tmy a také zajistit ostrovní provoz zdroje, pokud vypadla elektřina v lokální síti nebo by dokonce došlo až k celkovému kolapsu elektrizační soustavy. [2]

1.2 Současné zapojení zdroje do přenosové sítě

V současné době je výkon ze zdroje C-Energy Planá vyveden přes transformátory napětí 10,5 kV/110 kV na distribuční vedení 110 kV mezi Tábořem a Veselím nad Lužnicí. Do přenosové sítě na vedení 220 kV, vedoucí z Milína do Sokolnice, je pak vyveden přes transformátory napětí 110 kV/220 kV v rozvodně Tábor.



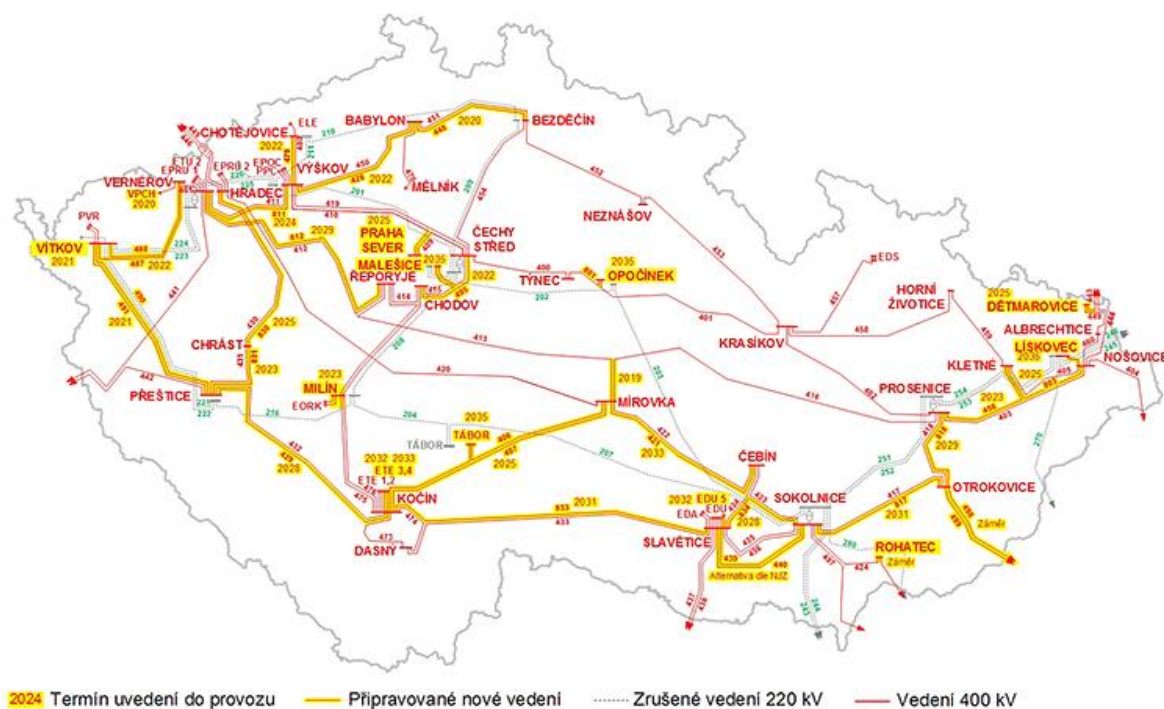
Obr. 1 Mapa současného vedení 110 kV a 220 kV v okolí Tábora [3]

1.3 Plánované změny v PS

V rámci modernizace a posílení přenosové kapacity přenosové soustavy společnost ČEPS hodlá do roku 2025 vybudovat nová vedení 400 kV. Společně s vybudováním nových vedení se plánují rekonstruovat i dané rozvodny. [4]

Rekonstrukce se týká vedení a rozveden:

- Verněřov-Vítkov
- Vítkov-Přeštice
- Přeštice-Kočín
- Kočín-Mírovka
- Mírovka-Sokolnice
- A mnoho dalších [4]



Obr. 2 Mapa vedeních 220 kV, které budou nahrazeny vedeními 400 kV [5]

V rámci diplomové práce je důležité nové vedení Kočín-Mírovka, které právě povede přes rozvodnu Tábor.

Důvodem pro vybudování nového vedení Kočín-Mírovka s označením V406/407 je předpokládaný nárůst výkonu současných zdrojů a výstavba nových zdrojů v jižních a severozápadních Čechách. Zejména plánovaná výstavba nového jaderného bloku v Jaderné elektrárně Temelín. Dále je potřeba tento výkon přepravit na východ České republiky. Dalším podstatným důvodem pro výstavbu nového vedení jsou mezinárodní tranzitní toky elektrické energie, které značně zatěžují přenosovou soustavu v České republice. [6]

Celé vedení o délce 121 km se má táhnout Jihočeským krajem a krajem Vysočina. [6]



Obr. 3 Trasa dvojitého vedení 400 kV z rozvodny Kočín do rozvodny Mírovka [6]

2 Volba vhodného softwaru pro stanovení zkratových poměrů

Jaký software pro výpočet zkratových poměrů zvolit je zásadní otázka. Software musí splňovat zásadní požadavky zadané od provozovatele zdroje C-Energy Planá.

Požadavky na software:

- Musí být volně dostupný a šiřitelný
- Snadná práce se softwarem, jednoduché upravování sítě
- Výpočet zkratových poměrů podle aktuální normy ČSN EN 60909-0
- Grafické rozhraní je výhodou.

2.1 Software PSP-UFU

Celým názvem Power System Platform of Federal University of Uberlândia je software vyvíjený na univerzitě v Uberlandii nacházející se v jihovýchodní Brazílii. Jedná se o open source multiplatformu energetických systémů, která je bezplatná a dvoujazyčná. Obsahuje funkce GUI (grafické uživatelské rozhraní) a nástroje CAD (počítačem podporované navrhování) pro elektroenergetické systémy.

V softwaru lze sestavit libovolná elektrická síť včetně řídicích systémů pomocí nasazení virtuálních vizuálních prvků. K zobrazení a zkoumání výsledků software používá různé textové dokumenty anebo tabulky či grafy. [7]

Nevýhoda tohoto softwaru je, že nepočítá přesně podle normy ČSN EN 60909-0.

Další informace z uživatelského hlediska o programu Pandaower jsou uvedeny v kapitole 4.3.

2.2 Software Pandapower

Ze spojení sady nástrojů pro analýzu energetického systému Pypower a knihovny datových analýz Pandas dohromady vznikl vylepšený software s názvem Pandapower, který nabízí rozsáhlou sadu nástrojů pro analýzu a optimalizaci v energetických systémech s vylepšeným řešením toku energie a další funkce pro zkoumání energetických systémů.

Komerční softwary jsou většinou velmi snadné a intuitivní na ovládání, ale velmi drahé. Na druhou stranu volně dostupné open-source softwary jsou zdarma, ale obvykle jim chybí detailnější možnosti v knihovně nástrojů pro řešení energetických systémů. Pandapower se

právě snaží snížit nedostatky mezi komerčními a volně dostupnými open-source programy pro analýzu energetických systémů.

V zásadě se Pandapower zaměřuje na řešení statických třífázových systémů. Řešení lze provádět pro symetrické i nesymetrické vedení, zátěž i zdroj. [8]

Výhodou tohoto softwaru je, že je dostupný zdarma a počítá podle aktuální normy ČSN EN 60909-0. Nevýhoda tohoto softwaru je absence grafického rozhraní a složitost práce s programem vyžadující znalost daného programovacího jazyka.

Další informace z uživatelského hlediska o programu Pandapower jsou uvedeny v kapitole 4.2.

2.3 Další softwary

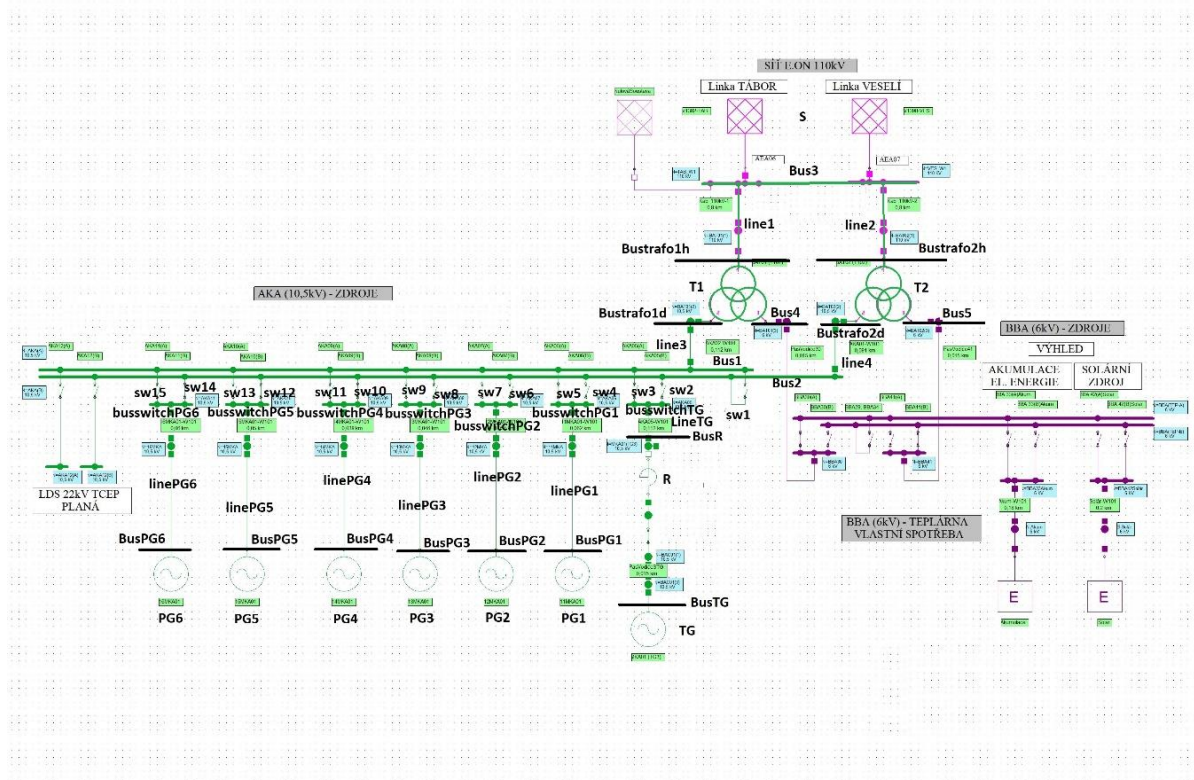
Pro výpočet zkratových poměrů je mnoho dalších programů. Bohužel téměř všechny nejsou volně dostupné a volně dostupné jsou například jen jejich demo verze na 30 dnů. Tyto programy, ale většinou počítají s normou ČSN EN 60909-0 a jsou tak potencionálně vhodné pro porovnání výsledků se softwarem PSP-UFU, který podle normy ČSN EN 60909-0 nepočítá.

Tabulka 2 Přehled dalších programů pro výpočet zkratových poměrů

Název softwaru	Dostupné zdarma	Demo verze	Demo omezení	Grafické rozhraní	Počítání dle normy ČSN EN 60909-0
ETAP	Ne	Ano na 30 dnů	12 sběrnic	Ano	Ano
Neplan	Ne	Ano	15 uzlů	Ano	Ano
Easypower	Ne	Ano	Neuvádí se	Ano	Ano
Elec calc	Ne	Ne		Ano	Ano
Power factory	Ne	Ano	Pouze pro výzkumné účely	Ano	Ano
PSS SINCAL	Ne	Ano	50 uzlů	Ano	Ano

3 Model sítě pro výpočet zkratových poměrů

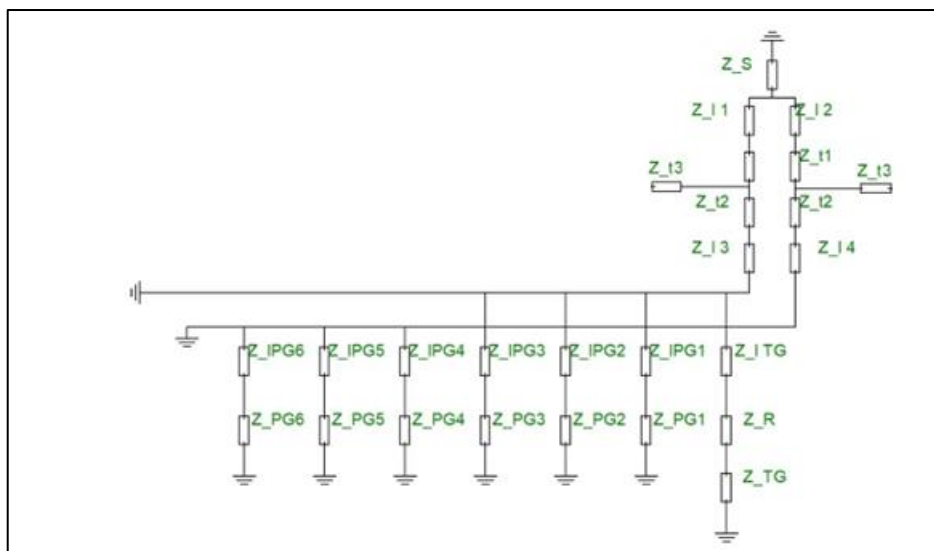
Model sítě vytvářím v programech Pandapower a PSP-UFU a týká se rozvodny 10,5 kV teplárny C-Energy, která je připojena přes transformátory 110/10,5/6,3 kV k distribuční soustavě 110 kV. Zapojení je znázorněno na obr. 4 (zvětšená podoba obr. 4 je uvedena v příloze 2).



Obr. 4 Schéma rozvodny 10,5 kV

3.1 Náhradní schéma

Na obr. 5 je vyobrazeno náhradní schéma pro výpočet zkratového proudu rozvodny 10,5 kV v konkrétním zapojení.



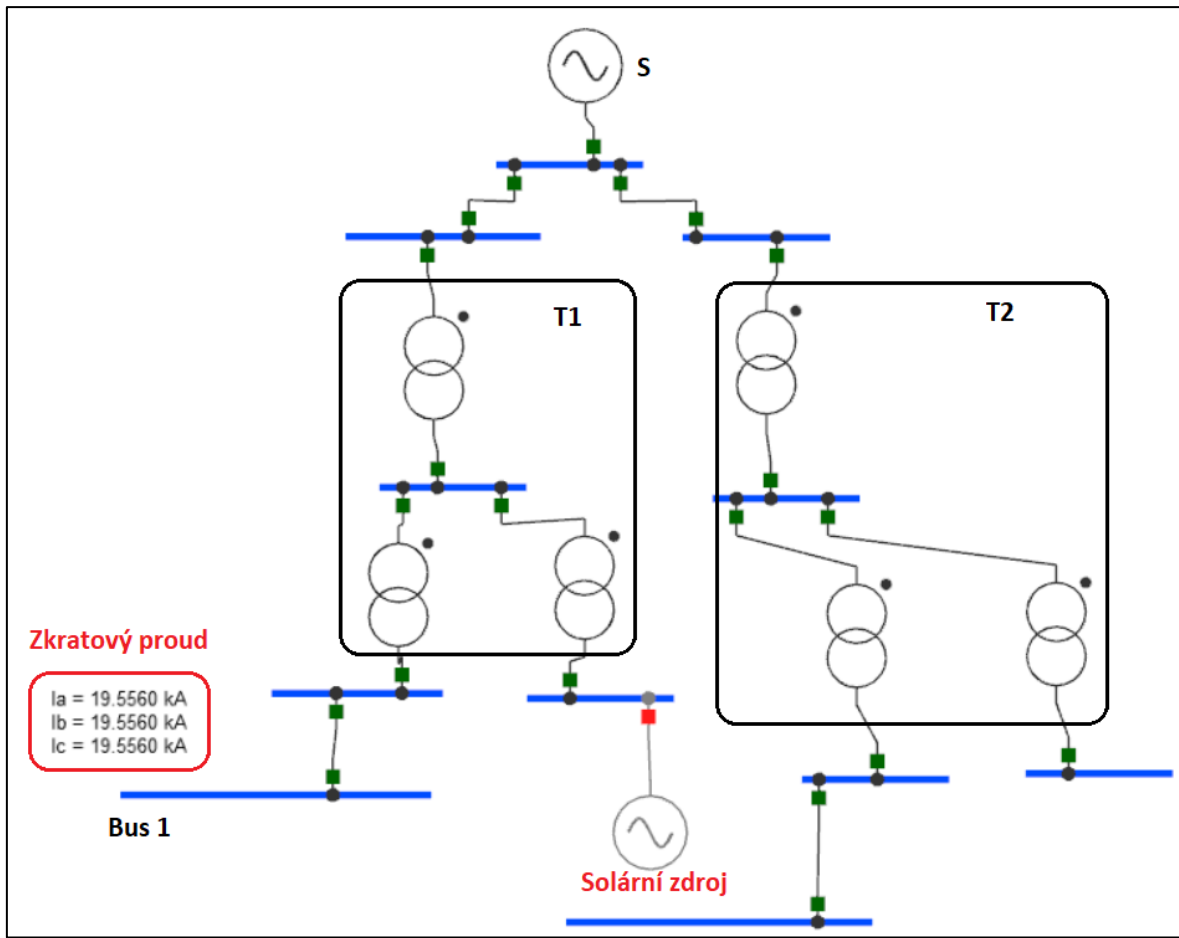
Obr. 5 Náhradní schéma rozvody 10,5 kV [15]

Vypočítané hodnoty parametrů pro jednotlivé komponenty soustavy pro náhradní schéma jsou uvedeny níže viz podkapitola ruční výpočet zkratu.

V simulaci, a tedy i v náhradním schématu jsem zanedbal solární zdroj (na obr. č.4 je to část sítě znázorněna fialovou barvou) z důvodu větší přehlednosti a usnadnění tvorby modelu sítě a z důvodu usnadnění a urychlení výpočtu zkratových poměrů za pomoci softwarů. Toto zanedbání lze provést kvůli velmi malému výkonu solárního zdroje v poměru k výkonu parního generátoru a k výkonům plynových motorů s generátory. Proto zanedbání solárního zdroje výpočet zkratových poměrů téměř neovlivní.

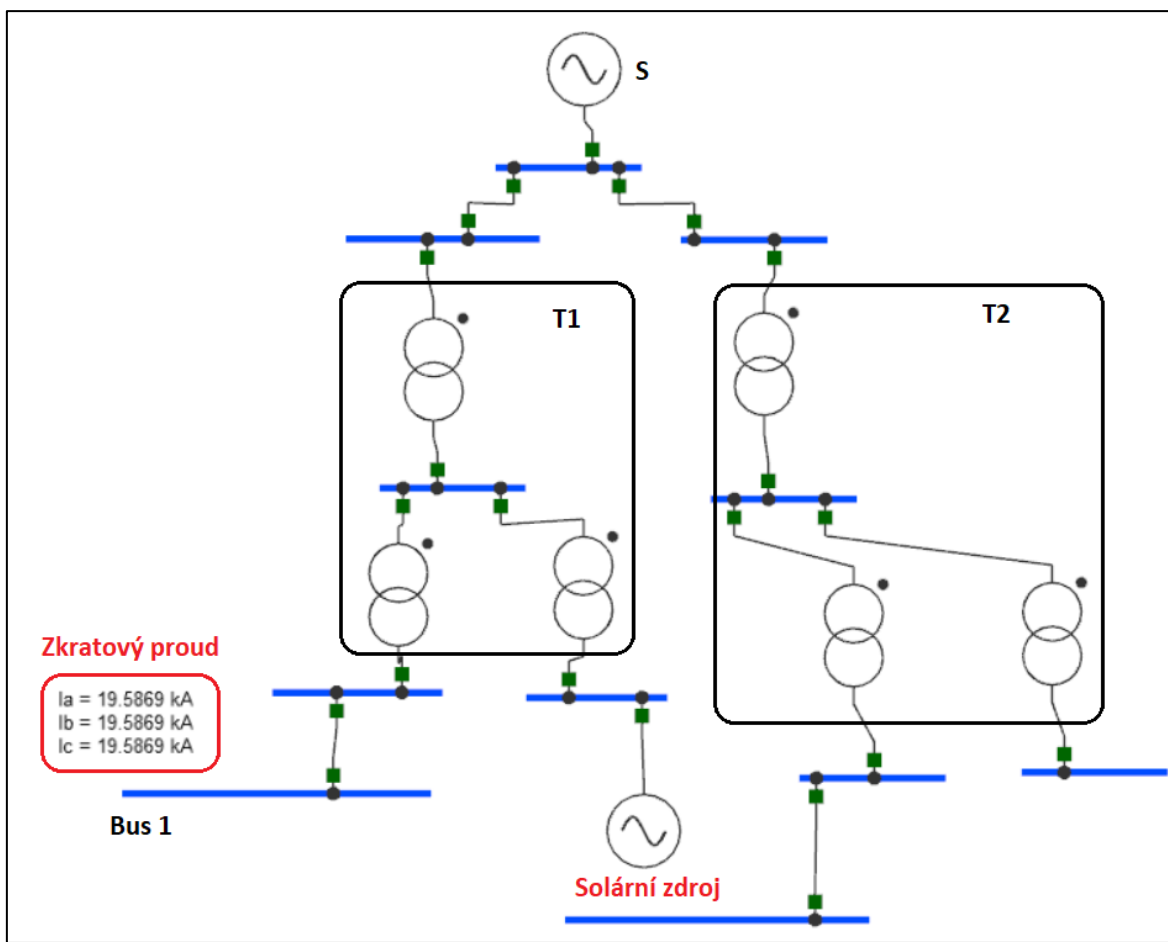
Důkaz, že lze zanedbat solární zdroj:

Na obr. č. 6 je simulován zkrat na přípojnici 1 pomocí programu PSP-UFU. Do soustavy je zapojena pouze externí síť (distribuční soustava 110 kV) a solární zdroj je odpojen. Za takových podmínek je třífázový zkrat na přípojnici 1 roven 19,5560 kA.



Obr. 6 Simulace výpočtu zkratu na přípojnici 1 pomocí softwaru PSP-UFU (odpojený solární zdroj) [12]

Na obr. č. 7 je také simulován zkrat na přípojnici 1 pomocí programu PSP-UFU. Do soustavy je zapojena pouze externí síť (distribuční soustava 110 kV), ale solární zdroj je zde připojen. Za takových podmínek je třífázový zkrat na přípojnici 1 roven 19,5869 kA.



Obr. 7 Simulace výpočtu zkratu na přípojnici 1 pomocí softwaru PSP-UFU (připojený solární zdroj) [12]

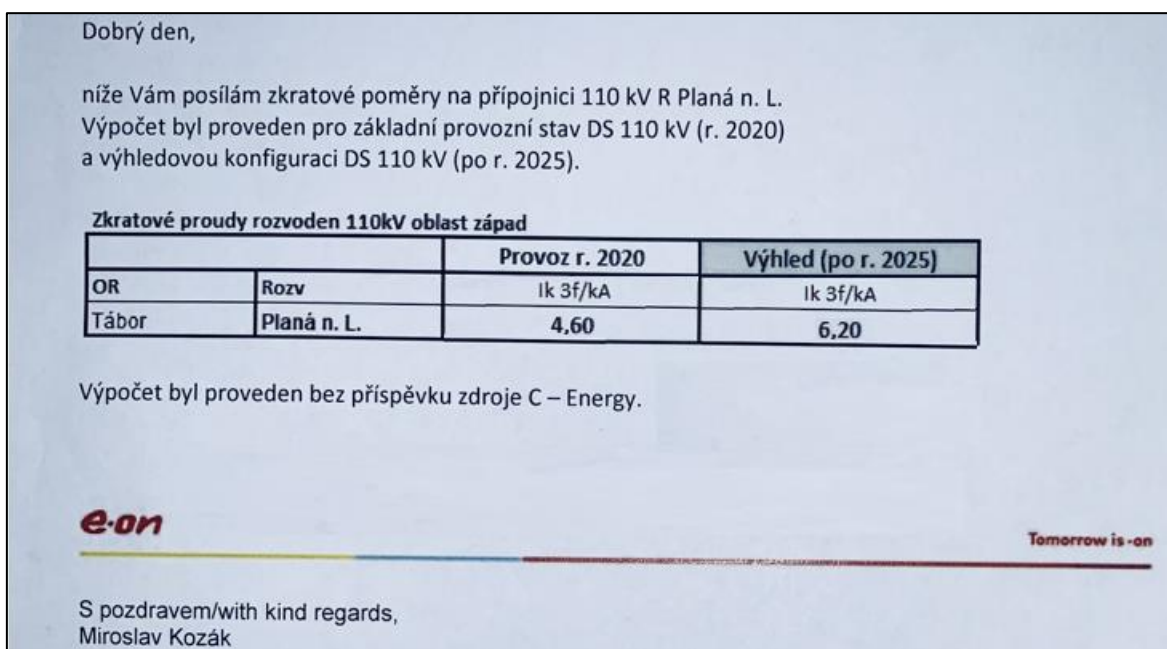
V tomto případě, kdy je do soustavy připojena jen externí soustava, je rozdíl mezi výslednými zkratovými proudy při odpojení a zapojeném solárním zdroji cca 31 A, což je odchylka asi 0,16 %. Případě zapojení dalších generátorů do sítě bude tato odchylka ještě výrazně menší. Solární zdroj je tedy opravdu zanedbatelný a do ručního výpočtu zkratu ani do simulace ho uvažovat nebudu.

3.2 Stanovení vstupních parametrů modelu

Správná parametrizace jednotlivých prvků elektrické sítě je pro simulaci zkratových poměrů zásadní. Od výrobců jednotlivých komponent sítě jsou v katalogových listech uvedeny určité parametry zařízení, které ale nemusí být vždy shodné s parametry, které požadují jako vstupní hodnoty pro výpočet zkratových poměrů výpočtové softwary. Je tedy nutno parametry přepočítat a převést do určité podoby, kterou softwary požadují. Je tomu i tak v případě softwarů Pandapower a PSP-UFU.

Externí síť (S)

Zkratový proud pro třífázový zkrat pro rozvodnu 110 kV v Plané nad Lužnicí bez příspěvku zdroje C-Energy byl vypočítán na hodnotu $I''_{k3f} = 4,6 \text{ kA}$ pro provoz v roce 2020 a pro výhledovou konfiguraci sítě v roce 2025 byla vypočítána hodnota třífázového zkratu $I''_{k3f} = 6,2 \text{ kA}$.



Obr. 8 Hodnoty zkratových proudů zaslané od p. Miroslava Kozáka

Požadované vstupní hodnoty pro Pandapower a PSP-UFU

- Požadovaná hodnota je zkratový výkon sítě. Pomocí rovnice 3.1 jsem přepočtl zkratový proud na zkratový výkon po současný stav i pro stav výhledový (po roce 2025).

$$S''_{k3f} = \sqrt{3} * U_n * I''_{k3f} \tag{3.1}$$

Trojvintu'ový transformátor (TR1-2)

Technické specifikace trojvintu'ového transformátoru jsou uvedeny na obr. 9.

Základní technické parametry:

Typ: ETR35M-3
 Provedení dle: ČSN EN 60 076

	VN	SN	NN
Výkon [MVA]	65	65	25
Napětí [kV]	121	10,5	6,3
Proud [A]	310	3574	2291
Počet stupňů (±)	8		
krok	2,00%		
Úpm [kV]	123	12	7,2
LI	450	75	60
AC	185	28	20
ACn	75		20

Počet fází: 3
 Frekvence: 50 Hz

Napětí nakrátko

Režim	uk	tolerance	ref. výkon
VN - SN	12,5 %	± 7,5%	65 MVA
SN - NN	5,5 %	inf.	25 MVA
VN - NN	11 %	inf.	25 MVA

Proud naprázdno: 0,2 % tolerance +30%

Skupina spojení: YNd1/yn0

Chlazení: OFAF Plný výkon do odbočky -6 %.

Ztráty:

Režim: VN / SN / NN	Po [kW]	Pk [kW]	Pcelk [kW]
65 / 65 / -	32	317	349
40 / 65 / 25	32	267 inf.	299 inf.
25 / - / 25	32	109 inf.	141 inf.
- / 25 / 25	32	98 inf.	130 inf.
tolerance	+15%	+15%	+10%

Obr. 9 Technické parametry trojvintu'ového transformátoru

Požadované vstupní hodnoty pro Pandapower

- **Jmenovité napětí primární, sekundární a terciární strany transformátoru.** Tyto hodnoty jsou uvedeny přímo na obr. 9.
- **Výkony primární, sekundární a terciární strany transformátoru.** Tyto hodnoty jsou uvedeny přímo na obr. 9.

- **Napětí nakrátko v procentech naměřených při určitém referenčním výkonu.** Tyto hodnoty jsou uvedeny přímo na obr. 9.
- **Ztráty naprázdno.** Tyto hodnoty jsou uvedeny přímo na obr. 9.
- **Proud naprázdno.** Tato hodnota je uvedena přímo na obr. 9.
- **Reálná část napětí nakrátko v procentech.** Tyto hodnoty jsem přepočítal z hodnot **ztrát nakrátko** uvedených na obr. 9 pomocí následujících rovnic.

$$u_{kr12\%} = \frac{\Delta P_{k12}}{S_{n65MVA}} = \frac{317 \cdot 10^{-3}}{65} * 100 = 0,488 \% \quad (3.2)$$

ΔP_{k12} měřeno při referenčním výkonu 65 MVA

$$u_{kr23\%} = \frac{\Delta P_{k23}}{S_{n25MVA}} = \frac{98 \cdot 10^{-3}}{25} * 100 = 0,392 \% \quad (3.3)$$

ΔP_{k23} měřeno při referenčním výkonu 25 MVA

$$u_{kr13\%} = \frac{\Delta P_{k13}}{S_{n25MVA}} = \frac{109 \cdot 10^{-3}}{25} * 100 = 0,436 \% \quad (3.4)$$

ΔP_{k13} měřeno při referenčním výkonu 25 MVA

Požadované vstupní hodnoty pro PSP-UFU

Požadované vstupní hodnoty pro simulaci trojvinut'ového transformátoru jsou vypsány níže viz podkapitola simulace trojvinut'ového transformátoru v PSP-UFU

Synchronní generátor (TG)

Podle specifikací je rázová reaktance stroje $x''_d = 5,69\%$. Další technické specifikace generátoru jsou uvedeny na obr. 10.

SYNCHRONNÍ		GEN	3	~	TYP	8H 630832/2	
PROVEDENÍ	IP 44	TVAR	IM 7311	Č.	051857		
26 000	kW	28 000	kVA	S1	MIN.		
50	Hz	cosφ	0,93	kVAr	3000	OT./MIN.	
SPOJENÍ	∩	10 500 ± 5 %	V	1540	A		
BUZENÍ		78 - 140	V	222 - 330	A		
		IC8 A1 W7	IZOL.	F	stat. 76540 rot.23630 kg		
			1998	IEC34			

Obr. 10 Štítek generátoru

Požadované vstupní hodnoty pro Pandapower

- **Činný výkon stroje.** Tato hodnota je uvedena přímo na obr. 10.
- **Jmenovitý zdánlivý výkon stroje.** Tato hodnota je uvedena přímo na obr. 10.
- **Jmenovité napětí stroje.** Tato hodnota je uvedena přímo na obr. 10.
- Rázová reaktance stroje v poměrných jednotkách. Tuto hodnotu jsem přepočítal z rázové reaktance stroje zadané v procentech, pomocí rovnice 3.5.

$$x''_d = \frac{x''_d\%}{100} = \frac{5,69}{100} = 0,0569 \quad (3.5)$$

- Činná složka impedance v ohmech. Tuto hodnotu jsem vypočítal podle rovnice 3.6.

$$\begin{aligned} R_g &= 0,07 * X''_d = 0,07 * (Z_{rg} * x''_d) = 0,07 * \left(\frac{U_n^2}{S_n} * x''_d \right) = \\ &= 0,07 * \left(\frac{(10,5 * 10^3)^2}{28 * 10^6} * 0,0569 \right) = 0,0157 \end{aligned} \quad (3.6)$$

(Hodnotu 0,07 jsem získal z tabulkových hodnot pro generátory z normy ČSN 33 3020)

- **Účinník stroje.** Tato hodnota je uvedena přímo na obr. 10.

Požadované vstupní hodnoty pro PSP-UFU

- **Činný výkon stroje.** Tato hodnota je uvedena přímo na obr. 10.
- **Jmenovitý zdánlivý výkon stroje.** Tato hodnota je uvedena přímo na obr. 10.

- **Jmenovité napětí stroje.** Tato hodnota je uvedena přímo na obr. 10.
- **Rázová reaktance stroje v poměrných jednotkách.** Tato hodnota je vypočítána v rovnici 3.5.
- **Činná složka impedance v poměrných jednotkách.** Tuto hodnotu jsem vypočítal pomocí činné složky impedance v ohmech vypočítané v rovnici 3.7.

$$r_g = R_g * \frac{1}{Z_{rg}} = 0,0157 * \frac{28 * 10^6}{(10,5 * 10^3)^2} = 0,0039873 \quad (3.7)$$

Plynové motor-generátory (PG 1-4)

Technické specifikace stroje jsou uvedeny na obr. 11.

RATINGS	
Output:	11702 kVA
Duty:	S1
Voltage:	10500 V
Current:	643 A
Power factor:	0,80
Frequency:	50 Hz
Speed:	750 rpm
Overspeed:	900 rpm
Direction of rotation (Facing drive end):	CCW
Weight:	29100 kg
Inertia:	2350 kgm ²
Protection by enclosure:	IP23
Cooling method:	IC0A1
Mounting arrangement:	IM1101
ASSUMED DATA	
Driving equipment:	Not Specified
Approx. mech. power:	9620 KW
EFFICIENCY in %	
load:	110 % 100 % 75 % 50 % 25 %
Efficiency @ power factor 0,80	97,25 97,29 97,29 96,91 95,13
Efficiency @ power factor 1,00	97,96 97,98 97,96 97,65 96,19
REACTANCES in %	
XD (U): 246,5	XD' (S): 35,5 XQ'' (S): 25,7 X0 (U): 13,4
XQ (U): 123,7	XD'' (S): 22,8 X2 (S): 24,3 XP (S): 29,2
X1 (U): 19,4	(S) = Saturated value, (U) = Unsaturated value
RESISTANCES AT 20 °C	
Stator winding:	0,0436 Ω Field winding: 0,7782 Ω
Excitation winding:	6,7 Ω

Obr. 11 Technické specifikace plynového motor-generátoru (PG 1-4)

Požadované vstupní hodnoty pro Pandapower

- **Jmenovitý zdánlivý výkon stroje.** Tato hodnota je uvedena přímo na obr. 11.
- **Jmenovité napětí stroje.** Tato hodnota je uvedena přímo na obr. 11.

- Rázová reaktance stroje v poměrných jednotkách. Tuto hodnotu jsem vypočítal pomocí rovnice 3.8 z **rázové reaktance stroje v procentech** uvedené přímo na obr. 11.

$$x''_d = \frac{x''_{d\%}}{100} = \frac{22,8}{100} = 0,228 \quad (3.8)$$

- **Činná složka impedance v ohmech**. Tato hodnota je pro teplotu 20 °C uvedena přímo na obr. 11. Aby hodnota odpovídala činná složce impedance pro provozní teplotu 75 °C, vynásobil jsem ji ještě koeficientem 1,25 (jak je uvedeno v rovnici 3.9).

$$R_{g75\text{ °C}} = R_{g20\text{ °C}} * 1,25 = 0,0436 * 1,25 = 0,055 \Omega \quad (3.9)$$

- **Účinník stroje**. Tato hodnota je uvedena přímo na obr. 11.

Požadované vstupní hodnoty pro PSP-UFU

- **Jmenovitý zdánlivý výkon stroje**. Tato hodnota je uvedena přímo na obr. 11.
- **Jmenovité napětí stroje**. Tato hodnota je uvedena přímo na obr. 11.
- Rázová reaktance stroje v poměrných jednotkách. Tato hodnota je vypočítána v rovnici 3.8.
- Činná složka impedance v poměrných jednotkách. Tuto hodnotu jsem vypočítal pomocí činné složky impedance v ohmech vypočítané v rovnici 3.10.

$$r_g = R_{g75\text{ °C}} * \frac{1}{Z_{rg}} = 0,055 * \frac{11702000}{10500^2} = 0,058377 \quad (3.10)$$

Plynové motor-generátory (PG 5-6)

Technické specifikace stroje jsou uvedeny na obr. 12.

RATINGS	
Output:	14340 kVA
Duty:	S1
Voltage:	10500 V
Current:	789 A
Power factor:	0.80
Frequency:	50 Hz
Speed:	750 rpm
Overspeed:	900 rpm
Direction of rotation (Facing drive end):	CCW
Weight:	36300 kg
Inertia:	3424 kgm ²
Protection by enclosure:	IP44
Cooling method:	IC8A1W7
Mounting arrangement:	IM1101
ASSUMED DATA	
Driving equipment:	Not Specified
Approx. engine power:	11720 KW
EFFICIENCY in % AT 95 °C	
Engine power:	110 %
Efficiency @ power factor 0.80	97.91 %
Efficiency @ power factor 1.00	98.41 %
	100 %
	75 %
	50 %
	25 %
	97.77 %
	97.30 %
	95.48 %
	98.37 %
	98.16 %
	97.60 %
	95.71 %
REACTANCES in %	
XD (U): 183.7	XD' (S): 24.5
XQ (U): 91.0	XD'' (S): 15.0
X1 (U): 12.4	(S) = Saturated value, (U) = Unsaturated value
XQ'' (S): 17.3	X0 (U): 8.8
X2 (S): 16.1	XP (S): 20.2
RESISTANCES AT 20 °C	
Stator winding:	0.0227 Ω
Excitation winding:	6.5 Ω
Field winding:	0.2698 Ω

Obr. 12 Technické specifikace plynového motor-generátoru (PG 1-4)

Požadované vstupní hodnoty pro Pandapower

- **Jmenovitý zdánlivý výkon stroje.** Tato hodnota je uvedena přímo na obr. 12.
- **Jmenovité napětí stroje.** Tato hodnota je uvedena přímo na obr. 12.
- **Rázová reaktance stroje v poměrných jednotkách.** Tuto hodnotu jsem vypočítal pomocí rovnice 3.11 z **rázové reaktance stroje v procentech** uvedené přímo na obr. 12.

$$x_d'' = \frac{x_d''\%}{100} = \frac{15}{100} = 0,15 \quad (3.11)$$

- **Činná složka impedance v ohmech.** Tato hodnota je pro teplotu 20 °C uvedena přímo na obr. 12. Aby hodnota odpovídala činné složce impedance

pro provozní teplotu 75 °C, vynásobil jsem ji ještě koeficientem 1,25 (jak je uvedeno v rovnici 3.12).

$$R_{g75\text{ °C}} = R_{g20\text{ °C}} * 1,25 = 0,0227 * 1,25 = 0,0284 \Omega \quad (3.12)$$

- **Účinník stroje.** Tato hodnota je uvedena přímo na obr. 12.

Požadované vstupní hodnoty pro PSP-UFU

- **Jmenovitý zdánlivý výkon stroje.** Tato hodnota je uvedena přímo na obr. 12.
- **Jmenovité napětí stroje.** Tato hodnota je uvedena přímo na obr. 12.
- **Rázová reaktance stroje v poměrných jednotkách.** Tato hodnota je vypočítána v rovnici 3.11.
- **Činná složka impedance v poměrných jednotkách.** Tuto hodnotu jsem vypočítal pomocí činné složky impedance v ohmech vypočítané v rovnici 3.13.

$$r_g = R_{g75\text{ °C}} * \frac{1}{Z_{rg}} = 0,0284 * \frac{14340000}{10500^2} = 0,003694 \quad (3.13)$$

Reaktor (R)

Technické specifikace reaktoru jsou uvedeny na obr. 13.

Transformer Type : REA/12	Serial Number : 69877	Standard : IEC60076-6:2007	
Rated Voltage HV : 10500 V	Rated Current HV : 1 600 A	Insulation Level : AC 28 - LI 0 KV	
Connection Symbol : OPEN PHASES	Number of Phases : 3	Rated Frequency : 50 Hz	
MEASUREMENT OF WINDINGS RESISTANCE			
TEMPERATURE : 23,3°C			
WINDING	TAP CHANGER POSITION	Ph-Ph RESISTANCE	
		TERMINALS	mOhm
10500	-	L1	1,6460
		L2	1,6480
		L3	1,6494
			Average value of resistance : 1,6478 mOhm
CALCULATION OF QUALITY FACTOR FQ AT 50 Hz :		CALCULATION OF IMPEDANCE (expressed in % of rated line voltage and current) :	
$FQ = \omega L / R = 110,0 \text{ at } 23,3\text{ °C}$		$Z\% : \frac{\omega L * I_r}{Un / \text{sqr}(3)} * 100 = 8,28 \text{ at } 23,3\text{ °C}$	

Obr. 13 Technické specifikace reaktoru

Požadované vstupní hodnoty pro Pandapower

- Jmenovitý výkon reaktoru. Tuto hodnotu jsem vypočítal pomocí rovnice 3.14 z hodnot **jmenovitého napětí reaktoru** a **jmenovitého proudu** reaktoru uvedených na obr. 13.

$$S_{nR} = \sqrt{3} * U_{nR} * I_{nR} = \sqrt{3} * 10500 * 1600 = 29,098 \text{ MVA} \quad (3.14)$$

- Reaktance reaktoru v poměrných jednotkách. Tuto hodnotu jsem vypočítal pomocí rovnice 3.15 z hodnoty **reaktance reaktoru v procentech** uvedené přímo na obr. 13.

$$x_R = \frac{x_{R\%}}{100} = \frac{8,28}{100} = 0,0828 \quad (3.15)$$

- Odpor reaktoru v poměrných jednotkách. Tuto hodnotu jsem vypočítal pomocí rovnice 3.16 z hodnoty **odporu reaktoru v ohmech** uvedené přímo na obr. 13.

$$r_R = R_R * \frac{1}{Z_{rR}} = R_R * \frac{1}{\frac{U_{nR}}{\sqrt{3} * I_{nR}}} = 1,6478 * 10^{-3} * \frac{1}{\frac{10500}{\sqrt{3} * 1600}} = 0,000435 \quad (3.16)$$

Požadované vstupní hodnoty pro PSP-UFU

V softwaru PSP-UFU nelze simulovat reaktor jako takový, proto jsem v tomto softwaru simuloval reaktor jako transformátor s převodem $p = 1$ a příslušnými hodnotami reaktoru. Všechny požadované hodnoty jsou stejné jako požadované hodnoty pro Pandapower.

Vodiče (Line 1-4, Line TG, Line PG1-6)

Parametry jednotlivých vodičů jsou uvedeny v tabulce 3.

Tabulka 3 Parametry vodičů

	R_l (Ω/km)	X_l (Ω/km)	l (km)	Počet paralelních vodičů n_l
Line 1,2	0,0749	0,243	0,8	1
Line 3	0,0469	0,1508	0,112	6
Line 4	0,0469	0,1508	0,091	6
Line TG	0,0469	0,1508	0,112	2
Line PG1	0,124	0,285	0,062	2
Line PG2	0,124	0,285	0,054	2
Line PG3	0,124	0,285	0,046	2
Line PG4	0,124	0,285	0,038	2
Line PG5	0,099	0,154	0,05	2
Line PG6	0,099	0,154	0,06	2

Požadované vstupní hodnoty

Softwary Pandapower a PSP-UFU požadují stejné vstupní parametry pro vodiče.

- Odpor, reaktance a délka kabelu jsou uvedeny v tabulce 3. Podle počtu vodičů (vodiče jsou k sobě paralelně) jsem vydělil jednotlivé hodnoty odporů a reaktancí podle rovnice 3.17 pro paralelní sčítání dvou a více stejných hodnot odporů/reaktancí.

$$\frac{1}{R_{\text{výs.}}} = \frac{1}{R_l} + \frac{1}{R_l} + \dots + \frac{1}{R_l} = n * \frac{1}{R_l} \rightarrow R_{\text{výs.}} = \frac{R_l}{n_l} \quad (3.17)$$

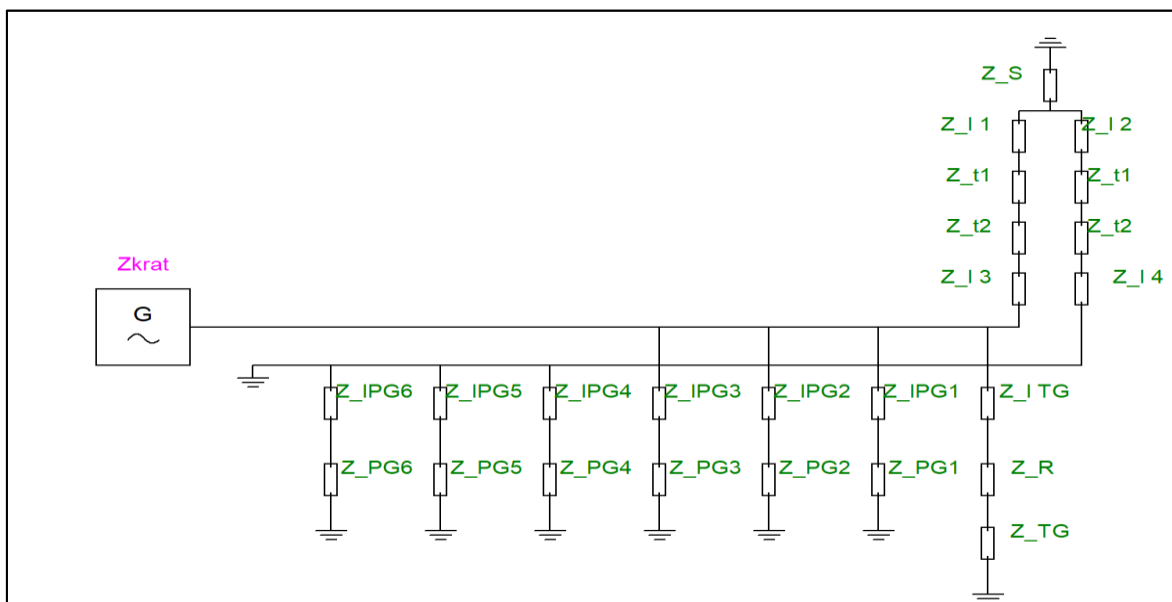
4 Porovnání zvolených softwarů z hlediska přesnosti výpočtu a praktického využití

V této kapitole se zabývám ručním výpočtem zkratu sítě a výpočtem zkratu sítě pomocí programů Pandapower a PSP-UFU.

Ruční výpočet jsem provedl pro jedno konkrétní zapojení, které je znázorněno na obr. č.5. Ruční výpočet zkratu jsem se rozhodl provést, abych měl kontrolní hodnoty, které mohou porovnávat se simulovanými zkratovými proudy z programu Pandapower a PSP-UFU. Tyto kontrolní hodnoty mi napovídají, jestli postupuji při tvorbě sítě pomocí programů správným směrem, jestli zadávám správně vstupní hodnoty do programu, jak přesně a s jakou odchylkou program počítá a jaké korekční koeficienty ve vzorcích program uvažuje, a které neuvažuje.

4.1 Ruční výpočet zkratu

Výpočet jsem provedl podle normy ČSN EN 60909-0 pro výpočet zkratových proudů v trojfázových střídavých soustavách. Náhradní schéma pro výpočet zkratu metodou ekvivalentního zdroje napětí v místě zkratu, které budu následně upravovat, je znázorněno na obr. 14.



Obr. 14 Výchozí náhradní schéma pro výpočet zkratu metodou ekvivalentního zdroje napětí v místě zkratu [15]

Vstupní hodnoty pro ruční výpočet zkratového proudu

Vstupní hodnoty pro jednotlivé komponenty sítě jsou zadány v technických specifikacích, katalogových listech nebo na štítku stroje, viz kapitola 3.2.

- Externí síť (S):

- $U_n = 110 \text{ kV}$
- $I''_{kS} = 6,2 \text{ kA}$
- $c_{max} = 1,1$

- Trojvintuřový transformátor (T1, T2):

Parametry pro trojvintuřový transformátor jsou převzaty z technických specifikací na obr. 9.

- $U_{nT,VN}/U_{nT,SN}/U_{nT,NN} = 121/10,5/6,3 \text{ kV}$
- $S_{nT,VN}/S_{nT,SN}/S_{nT,NN} = 65/65/25 \text{ MVA}$
- $u_{k12\%} = 12,5 \%$ (Měřeno při referenčním výkonu 65 MVA)
- $u_{k23\%} = 5,5 \%$ (Měřeno při referenčním výkonu 25 MVA)
- $u_{k13\%} = 11 \%$ (Měřeno při referenčním výkonu 25 MVA)
- $\Delta P_{k12} = 317 \text{ kW}$ (Měřeno při referenčním výkonu 65 MVA)
- $\Delta P_{k23} = 98 \text{ kW}$ (Měřeno při referenčním výkonu 25 MVA)
- $\Delta P_{k13} = 109 \text{ kW}$ (Měřeno při referenčním výkonu 25 MVA)

- Synchronní generátor (TG)

Parametry pro synchronní generátor jsou převzaty ze štítku stroje na obr. 10.

- $U_{nG} = 10,5 \text{ kV}$
- $S_{nG} = 28 \text{ MVA}$
- $x''_{d\%} = 5,69 \%$
- $\cos \varphi = 0,93$

- Plynové motor-generátory (PG 1-4)

Parametry pro plynové motor-generátory 1-4 jsou převzaty z technických specifikací na obr. 11.

- $U_{nG} = 10,5 \text{ kV}$
- $S_{nG} = 11,702 \text{ MVA}$
- $x''_{d\%} = 22,8 \%$
- $\cos \varphi = 0,8$

- Plynové motor-generátory (PG 5-6)

Parametry pro plynové motor-generátory 5-6 jsou převzaty z technických specifikací na obr. 12.

- $U_{nG} = 10,5 \text{ kV}$
- $S_{nG} = 14,34 \text{ MVA}$
- $x''_{d\%} = 15 \%$
- $\cos \varphi = 0,8$

- Reaktor (R)

Parametry pro reaktor jsou převzaty z technických specifikací na obr. 13.

- $U_{nR} = 10,5 \text{ kV}$
- $I_{nR} = 1 \text{ 600 A}$
- $x_{R\%} = 8,28 \%$
- $R_R = 0,00165 \Omega$

- Vodiče (L1-L4, L TG, L PG1-6)

Parametry vodičů jsou uvedeny v tabulce 3.

Výpočet zkratového proudu

Jednotlivé zkratové impedance sítě pro výpočet zkratového proudu jsem vypočítal podle následujících rovnic vycházejících z normy ČSN EN 60909-0. [11]

- Elektrizační soustava:

Zkratová impedance elektrizační soustavy:

$$Z_S = \frac{c_{max} * U_{nS}}{\sqrt{3} * I''_{kS}} * \frac{1}{p^2} = \frac{1,1 * 110}{\sqrt{3} * 6,2} * \frac{10,5^2}{121^2} = 0,08485 \Omega \quad (4.1)$$

Zkratová reaktance elektrizační soustavy podle tabulkových hodnot: [10]

$$X_S = 0,995 * Z_S = 0,995 * 0,08485 = 0,08442 \Omega \quad (4.2)$$

Zkratový činný odpor elektrizační soustavy podle tabulkových hodnot: [10]

$$R_S = 0,1 * X_S = 0,1 * 0,08442 = 0,00844 \Omega \quad (4.3)$$

- Generátory

Korekční součinitel pro zkratovou impedanci generátoru TG:

$$K_G = \frac{U_n}{U_{nG}} * \frac{c_{max}}{1 + x''_d * \sqrt{1 - \cos^2 \varphi}} = \frac{10,5}{10,5} * \frac{1,1}{1 + 0,0569 * \sqrt{1 - 0,93^2}} = 1,07747 \quad (4.4)$$

Zkratová impedance, činný odpor a reaktance generátoru TG:

$$X_{TG} = \frac{x''_d \%}{100} * \frac{U_{nG}^2}{S_{nG}} * K_g = \frac{5,69}{100} * \frac{10,5^2}{28} * 1,07747 = 0,2414 \Omega \quad (4.5)$$

$$R_{TG} = 0,07 * X_G = 0,07 * 0,2414 = 0,0169 \Omega \quad (4.6)$$

$$Z_{TG} = \sqrt{X_G^2 + R_G^2} = \sqrt{0,2414^2 + 0,0169^2} = 0,24199 \Omega \quad (4.7)$$

Zkratová impedance, činný odpor a reaktance generátorů PG:

$$X_{PG1} = \frac{x''_d \%}{100} * \frac{U_{nG}^2}{S_{nG}} * K_g = \frac{22,8}{100} * \frac{10,5^2}{11,702} * 0,9676 = 2,078557 \Omega \quad (4.8)$$

$$R_{PG1} = R_{g75^\circ C} * K_g = 0,55 * K_g = 0,0169 \Omega \quad (4.9)$$

(Hodnota $R_{g75^\circ C}$ pro PG1, PG2, PG3, PG4 je získána z rovnice 3.9. Pro PG5 a PG6 je hodnota $R_{g75^\circ C}$ získána z rovnice 3.12.)

$$Z_{PG1} = \sqrt{X_G^2 + R_G^2} = \sqrt{2,078557^2 + 0,0169^2} = 2,078557 \Omega \quad (4.10)$$

POROVNÁNÍ ZVOLENÝCH SOFTWAREŮ Z HLEDISKA PŘESNOSTI VÝPOČTU A PRAKTICKÉHO VYUŽITÍ

Tabulka 4 Dopočtené hodnoty korekčních koeficientů a zkratových impedancí pro všechny generátory v síti

	$K_G(-)$	$R(\Omega)$	$X(\Omega)$	$Z(\Omega)$
TG	1,07747	0,016898	0,241399	0,24199
PG1	0,09676	0,05322	2,078557	2,079238
PG2	0,09676	0,05322	2,078557	2,079238
PG3	0,09676	0,05322	2,078557	2,079238
PG4	0,09676	0,05322	2,078557	2,079238
PG5	1,00917	0,028661	1,163823	1,164176
PG6	1,00917	0,028661	1,163823	1,164176

- Trojvintuťový transformátor

Korekční součinitelé pro zkratovou impedanci transformátoru:

$$K_{T12} = 0,95 * \frac{c_{max}}{1+0,6*u_{k12}} = 0,95 * \frac{1,1}{1+0,6*0,125} = 0,97209 \quad (4.11)$$

$$K_{T23} = 0,95 * \frac{c_{max}}{1+0,6*u_{k23}} = 0,95 * \frac{1,1}{1+0,6*0,055} = 1,01162 \quad (4.12)$$

$$K_{T13} = 0,95 * \frac{c_{max}}{1+0,6*u_{k13}} = 0,95 * \frac{1,1}{1+0,6*0,11} = 0,9803 \quad (4.13)$$

Zkratové impedance, činné odpory a reaktance transformátoru:

$$Z_{T12} = \frac{u_{k12\%}}{100} * \frac{U_{nT,SN}^2}{S_{n65MVA}} * K_{T12} = \frac{12,5}{100} * \frac{10,5^2}{65} * 0,97209 = 0,2061 \Omega \quad (4.14)$$

$$Z_{T23} = \frac{u_{k23\%}}{100} * \frac{U_{nT,SN}^2}{S_{n25MVA}} * K_{T23} = \frac{5,5}{100} * \frac{10,5^2}{25} * 1,01162 = 0,2454 \Omega \quad (4.15)$$

$$Z_{T13} = \frac{u_{k13\%}}{100} * \frac{U_{nT,SN}^2}{S_{n25MVA}} * K_{T13} = \frac{11}{100} * \frac{10,5^2}{25} * 0,9803 = 0,4755 \Omega \quad (4.16)$$

$$R_{T12} = \frac{\Delta P_{k12}}{S_{n65MVA}} * \frac{U_{nT,SN}^2}{S_{n65MVA}} * K_{T12} = \frac{317}{65*10^3} * \frac{10,5^2}{65} * 0,97209 = 0,00804 \Omega \quad (4.17)$$

$$R_{T23} = \frac{\Delta P_{k23}}{S_{n25MVA}} * \frac{U_{nT,SN}^2}{S_{n25MVA}} * K_{T23} = \frac{98}{25*10^3} * \frac{10,5^2}{25} * 1,01162 = 0,01749 \Omega \quad (4.18)$$

$$R_{T13} = \frac{\Delta P_{k13}}{S_{n25MVA}} * \frac{U_{nT,SN}^2}{S_{n25MVA}} * K_{T13} = \frac{109}{25*10^3} * \frac{10,5^2}{25} * 0,9803 = 0,01885 \Omega \quad (4.19)$$

$$X_{T12} = \sqrt{Z_{T12}^2 - R_{T12}^2} = \sqrt{0,2061^2 - 0,00804^2} = 0,20595 \Omega \quad (4.20)$$

$$X_{T23} = \sqrt{Z_{T23}^2 - R_{T23}^2} = \sqrt{0,2454^2 - 0,01749^2} = 0,24474 \Omega \quad (4.21)$$

$$X_{T13} = \sqrt{Z_{T13}^2 - R_{T13}^2} = \sqrt{0,4755^2 - 0,01885^2} = 0,47517 \Omega \quad (4.22)$$

Sousledné zkratové impedance, činné odpory a reaktance transformátoru:

$$R_{T1} = \frac{R_{T12} + R_{T13} - R_{T23}}{2} = \frac{0,00804 + 0,01885 - 0,01749}{2} = 0,0047 \Omega \quad (4.23)$$

$$R_{T2} = \frac{R_{T12} + R_{T23} - R_{T13}}{2} = \frac{0,00804 + 0,01749 - 0,01885}{2} = 0,00334 \Omega \quad (4.24)$$

$$R_{T3} = \frac{R_{T13} + R_{T23} - R_{T12}}{2} = \frac{0,01885 + 0,01749 - 0,00804}{2} = 0,01415 \Omega \quad (4.25)$$

$$X_{T1} = \frac{X_{T12} + X_{T13} - X_{T23}}{2} = \frac{0,20595 + 0,47517 - 0,24474}{2} = 0,21819 \Omega \quad (4.26)$$

$$X_{T2} = \frac{X_{T12} + X_{T23} - X_{T13}}{2} = \frac{0,20595 + 0,24474 - 0,47517}{2} = -0,0122 \Omega \quad (4.27)$$

$$X_{T3} = \frac{X_{T13} + X_{T23} - X_{T12}}{2} = \frac{0,47517 + 0,24474 - 0,20595}{2} = 0,25698 \Omega \quad (4.28)$$

- Vodiče

Zkratová impedance, činný odpor a reaktance vodiče L1 přepočítány z napěťové hladiny 121 kV na hladinu 10,5kV:

$$X_v = \left(\frac{X_l * l}{n_l} * \frac{1}{p^2} \right) / n_l = \left(\frac{0,243 * 0,8}{1} * \frac{10,5^2}{121^2} \right) / 1 = 0,00146 \Omega \quad (4.29)$$

$$R_v = \left(\frac{R_l * l}{n_l} = \frac{X_l * l}{n_l} * \frac{1}{p^2} \right) / n_l = \left(\frac{0,0749 * 0,8}{1} * \frac{10,5^2}{121^2} \right) / 1 = 0,00045 \Omega \quad (4.30)$$

$$Z_v = \sqrt{R_v^2 - X_v^2} = 0,00153 \Omega \quad (4.31)$$

Tabulka 5 Dopočtené hodnoty zkratových impedancí pro všechny vodiče v síti přepočtené na napěťovou hladinu 10,5 kV

	R(Ω)	X(Ω)	Z(Ω)
L1, L2	0,000451	0,001464	0,001532
L3	0,000875	0,002815	0,002948
L4	0,000711	0,002287	0,002395
L_TG	0,002626	0,008445	0,008844
L_PG1	0,003844	0,008835	0,009635
L_PG2	0,003348	0,007695	0,008392
L_PG3	0,002852	0,006555	0,007149
L_PG4	0,002356	0,005415	0,005905
L_PG5	0,002475	0,00385	0,004577
L_PG6	0,00297	0,00462	0,005492

- Reaktor

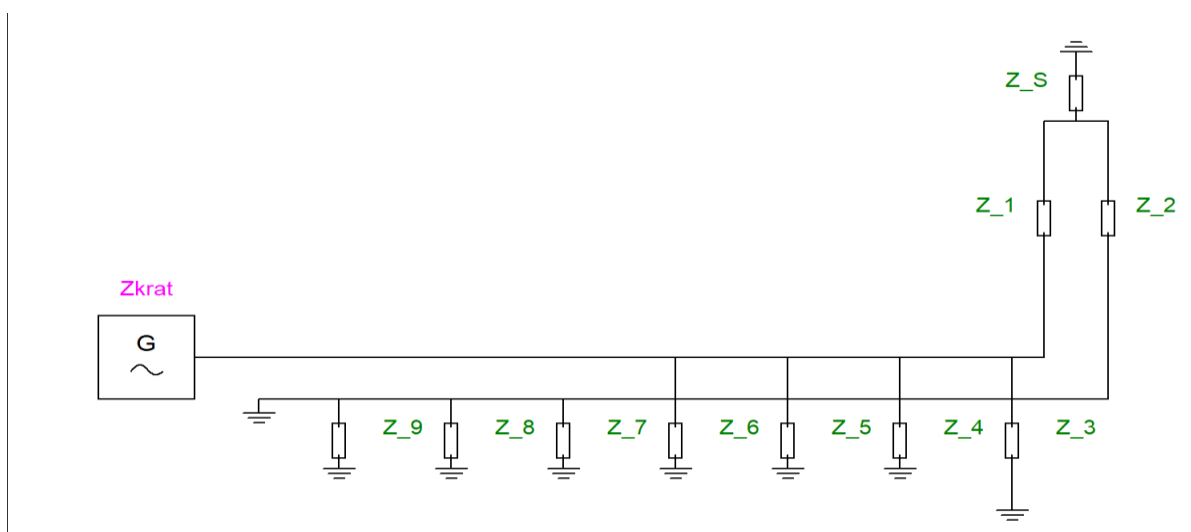
Zkratová impedance, činný odpor a reaktance reaktoru:

$$Z_R = \frac{x_{R\%}}{100} * \frac{U_{nR}}{\sqrt{3} * I_{nR}} = \frac{8,28}{100} * \frac{10,5}{\sqrt{3} * 1,6} = 0,31372 \Omega \quad (4.32)$$

$$R_R = 0,00165 \Omega \quad (4.33)$$

$$X_R = \sqrt{Z_R^2 - R_R^2} = \sqrt{0,31372^2 - 0,00165^2} = 0,31371 \Omega \quad (4.34)$$

Dále jsem upravil schéma na obr. 14 podle následujících schémat a rovnic, abych dostal výslednou zkratovou impedanci.



Obr. 15 První úprava schématu [15]

Sériové spojení impedancí $\bar{Z}_{L1}, \bar{Z}_{T1}, \bar{Z}_{T2}, \bar{Z}_{L3}$:

$$\begin{aligned}\bar{Z}_1 &= \bar{Z}_{L1} + \bar{Z}_{T1} + \bar{Z}_{T2} + \bar{Z}_{L3} = \\ &= (0,0005 + j0,0015) + (0,0047 + j0,2182) + (0,0033 - j0,0122) + \\ &\quad + (0,0009 + j0,0028) = (0,0094 + j0,2102) \Omega\end{aligned}\quad (4.35)$$

Sériové spojení impedancí $\bar{Z}_{L2}, \bar{Z}_{T1}, \bar{Z}_{T2}, \bar{Z}_{L4}$:

$$\begin{aligned}\bar{Z}_2 &= \bar{Z}_{L2} + \bar{Z}_{T1} + \bar{Z}_{T2} + \bar{Z}_{L4} = \\ &= (0,0005 + j0,0015) + (0,0047 + j0,2182) + (0,0033 - j0,0122) + \\ &\quad + (0,0007 + j0,0023) = (0,0092 + j0,2097) \Omega\end{aligned}\quad (4.36)$$

Sériové spojení impedancí $\bar{Z}_{L_{TG}}, \bar{Z}_R, \bar{Z}_{TG}$:

$$\begin{aligned}\bar{Z}_3 &= \bar{Z}_{L_{TG}} + \bar{Z}_R + \bar{Z}_{TG} = \\ &= (0,0026 + j0,0084) + (0,0016 + j0,3137) + (0,0169 + j0,2414) = \\ &\quad = (0,0212 + j0,5636) \Omega\end{aligned}\quad (4.37)$$

Sériové spojení impedancí $\bar{Z}_{L_{PG1}}, \bar{Z}_{PG1}$:

$$\begin{aligned}\bar{Z}_4 &= \bar{Z}_{L_{PG1}} + \bar{Z}_{PG1} = (0,0038 + j0,0088) + (0,0532 + j2,0786) = \\ &\quad = (0,0571 + j2,0874) \Omega\end{aligned}\quad (4.38)$$

Sériové spojení impedancí $\bar{Z}_{L_{PG2}}, \bar{Z}_{PG2}$:

$$\begin{aligned}\bar{Z}_5 &= \bar{Z}_{L_{PG2}} + \bar{Z}_{PG2} = (0,0033 + j0,0077) + (0,0532 + j2,0786) = \\ &\quad = (0,0566 + j2,0863) \Omega\end{aligned}\quad (4.39)$$

Sériové spojení impedancí $\bar{Z}_{L_{PG3}}, \bar{Z}_{PG3}$:

$$\begin{aligned}\bar{Z}_6 &= \bar{Z}_{L_{PG3}} + \bar{Z}_{PG3} = (0,0029 + j0,066) + (0,0532 + j2,0786) = \\ &\quad = (0,0561 + j2,0851) \Omega\end{aligned}\quad (4.40)$$

Sériové spojení impedancí $\bar{Z}_{L_{PG4}}, \bar{Z}_{PG4}$:

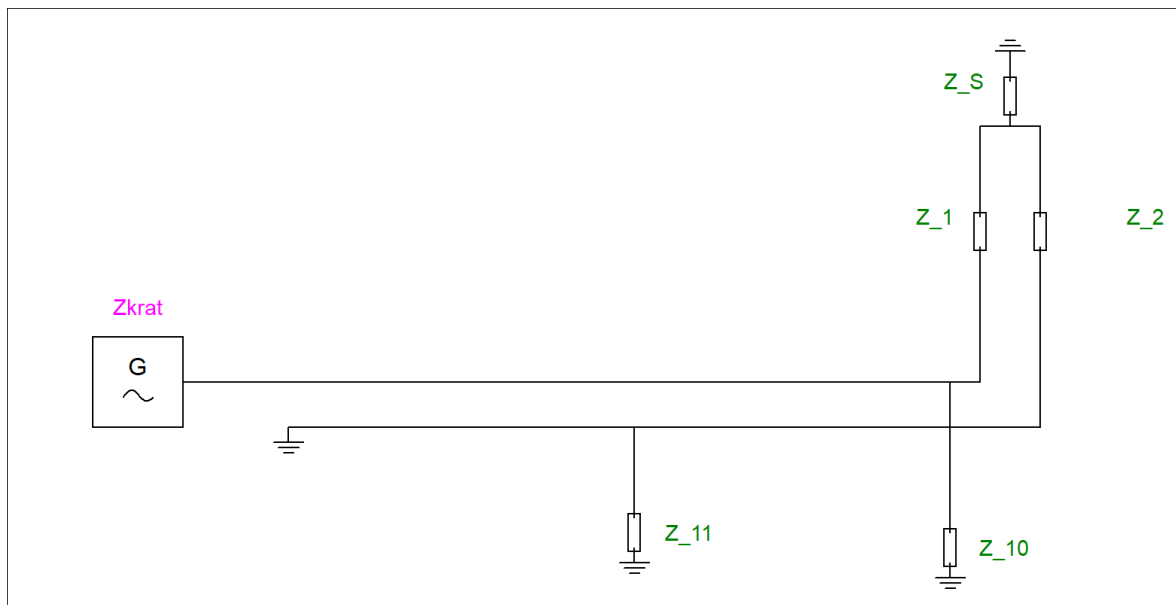
$$\begin{aligned}\bar{Z}_7 &= \bar{Z}_{L_{PG4}} + \bar{Z}_{PG4} = (0,0024 + j0,0054) + (0,0532 + j2,0786) = \\ &= (0,0556 + j2,0840) \Omega\end{aligned}\quad (4.41)$$

Sériové spojení impedancí $\bar{Z}_{L_{PG5}}, \bar{Z}_{PG5}$:

$$\begin{aligned}\bar{Z}_8 &= \bar{Z}_{L_{PG5}} + \bar{Z}_{PG5} = (0,0025 + j0,0039) + (0,0287 + j1,1638) = \\ &= (0,0311 + j1,1677) \Omega\end{aligned}\quad (4.42)$$

Sériové spojení impedancí $\bar{Z}_{L_{PG6}}, \bar{Z}_{PG6}$:

$$\begin{aligned}\bar{Z}_9 &= \bar{Z}_{L_{PG6}} + \bar{Z}_{PG6} = (0,0030 + j0,0046) + (0,0287 + j1,1638) = \\ &= (0,0316 + j1,1684) \Omega\end{aligned}\quad (4.43)$$



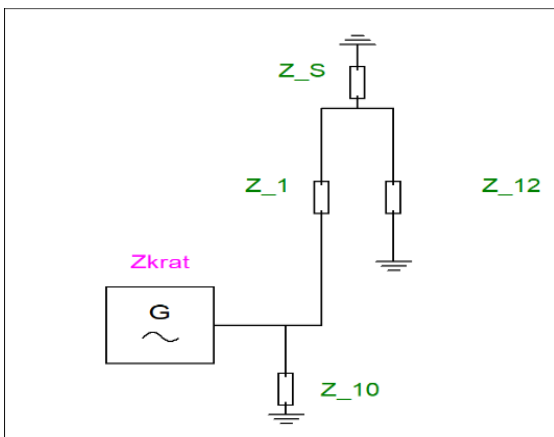
Obr. 16 Druhá úprava schématu [15]

Paralelní spojení impedancí $\bar{Z}_3, \bar{Z}_4, \bar{Z}_5, \bar{Z}_6$:

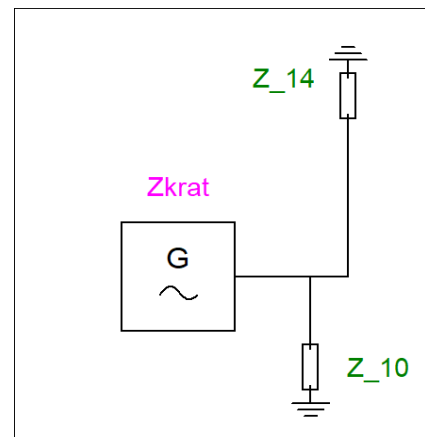
$$\begin{aligned} \bar{Z}_{10} &= \left(\frac{1}{\bar{Z}_3} + \frac{1}{\bar{Z}_4} + \frac{1}{\bar{Z}_5} + \frac{1}{\bar{Z}_6} \right)^{-1} = \\ &= \left(\frac{1}{0,0212 + j0,5636} + \frac{1}{0,057 + j2,0874} + \frac{1}{0,0566 + j2,0863} + \frac{1}{0,0561 + j2,0851} \right)^{-1} \\ &= (0,0102 + j0,3113) \Omega \end{aligned} \quad (4.44)$$

Paralelní spojení impedancí $\bar{Z}_7, \bar{Z}_8, \bar{Z}_9$:

$$\begin{aligned} \bar{Z}_{11} &= \left(\frac{1}{\bar{Z}_7} + \frac{1}{\bar{Z}_8} + \frac{1}{\bar{Z}_9} \right)^{-1} = \\ &= \left(\frac{1}{0,0556 + j2,0840} + \frac{1}{0,0311 + j1,1677} + \frac{1}{0,0316 + j1,1684} \right)^{-1} = \\ &= (0,0122 + j0,4562) \Omega \end{aligned} \quad (4.45)$$



Obr. 17 Třetí úprava schématu [15]



Obr. 18 Finální úprava schématu [15]

Sériové spojení impedancí \bar{Z}_{11}, \bar{Z}_2 :

$$\begin{aligned} \bar{Z}_{12} &= \bar{Z}_{11} + \bar{Z}_2 = (0,0122 + j0,4562) + (0,0092 + j0,2097) = \\ &= (0,0214 + j0,6659) \Omega \end{aligned} \quad (4.46)$$

Paralelní spojení impedancí \bar{Z}_{12}, \bar{Z}_S se spojením s impedancí \bar{Z}_1 sériově:

$$\begin{aligned} \bar{Z}_{14} &= \bar{Z}_1 + \left(\frac{1}{\bar{Z}_{12}} + \frac{1}{\bar{Z}_S} \right)^{-1} = \\ &= (0,0094 + j0,2102) + \left(\frac{1}{0,0214 + j0,6659} + \frac{1}{0,0084 + j0,0844} \right)^{-1} = \\ &= (0,0163 + j0,2852) \Omega \end{aligned} \quad (4.47)$$

Paralelní spojení impedancí $\bar{Z}_{14}, \bar{Z}_{10}$

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{vysledné} &= \left(\frac{1}{\bar{Z}_{14}} + \frac{1}{\bar{Z}_{10}} \right)^{-1} = \left(\frac{1}{0,0163 + j0,2852} + \frac{1}{0,0102 + j0,3113} \right)^{-1} = \\ &= (0,0068 + j0,1489 \Omega) \end{aligned} \quad (4.48)$$

Nakonec jsem podle následující rovnice vypočítal počáteční rázový zkratový proud.

$$I''_{k3f} = \frac{c_{max} * U_n}{\sqrt{3} * Z_{vysledné}} = \frac{1,1 * 10,5}{\sqrt{3} * 0,1490} = 44,751 \text{ kA} \quad (4.49)$$

4.2 Výpočet zkratu pomocí programu Pandapower

Simulovat zkratové poměry sítě v programu Pandapower jsem se rozhodl hned z několika důvodů. Software je volně dostupný ke stažení, lze v něm simulovat rozsáhlé elektrické sítě téměř bez žádného omezení a provádí výpočty zkratových poměrů podle normy ČSN EN 60909-0, takže by měl počítat co nejpřesněji a nejvíce se blížit výsledku zkratového proudu spočítaného ručně. Dále nabízí k simulaci rozsáhlé portfolio prvků elektrické sítě. Navíc lze ke každému prvku elektrické sítě přiřadit nespočet parametru, které prvek definují.

Možnost přiřadit k prvku elektrické sítě hodně parametrů přináší také značné nevýhody. K prvku se mohou a také nemusí přiřadit některé parametry, pak má, ale každý prvek parametry povinné, které se k prvku přiřadit musí. Tyto parametry nemusí být pro výpočet zkratových poměrů důležité, ale přesto se musí zadávat. Dále si nelze vybrat v jakých jednotkách a v jaké podobě chci parametr zadávat. Proto se mnohdy musí parametry složitě přepočítávat do příslušné podoby.

Co se týče instalace programu, je to pro obyčejného uživatele počítačové techniky složitější. Program Pandapower je napsaný v programovacím jazyce Python. Pro instalaci výpočtových modulů Pandapower je nejprve potřeba nainstalovat rozhraní Anaconda a poté pomocí příkazů v příkazovém řádku v rozhraní Anaconda tyto moduly nainstalovat. Následně je možné zadávat do příkazového řádku příkazy pro tvorbu elektrické sítě a výpočet elektrických parametrů. Nicméně tvorba elektrické sítě v příkazovém řádku je velice nepraktická a je potřeba stáhnout vývojové prostředí pro jazyk Python, kde je práce s příkazy a výsledky simulace značně jednodušší a přehlednější.

Jak již bylo řečeno program Pandapower je napsaný v programovacím jazyce Python a také příkazy a struktura psaní příkazů je v souladu s jazykem Python. Avšak program Pandapower má na svých internetových stránkách (www.pandapower.readthedocs.io) velice podrobný a přehledný návod pro tvorbu elektrické sítě a pro každý komponent sítě detailní popis určitého příkazu pro jeho simulaci, a navíc i popis, jak program s daným komponentem počítá.

Jako velmi pozitivní věc na programu Pandapower vidím generování výsledků. Stiskem jednoho tlačítka program po pár sekundách (doba trvání generování výsledků závisí na rozsáhlosti sítě) vygeneruje výsledky požadovaných zkratových proudů pro každou nasimulovanou přípojnicí v síti. Lze nastavit i generování výsledků pro zkrat nejen na samotné přípojnicí, ale také na jednotlivých prvcích sítě. Nicméně tato možnost je zatím v pozici testování a program nezaručuje správné výsledky. S výslednými zkratovými proudy

program vygeneruje také výsledné zkratové impedance, což jsem bral taky jako velké plus. Právě zkratové impedance, ať už jednotlivých prvků, nebo celé zkratové cesty jsem porovnával se zkratovou impedancí prvků a zkratové cesty vypočítaných ručně a podle toho kontroloval, jestli modelují správné zapojení prvků v síti a k jednotlivým prvkům přiřazují správně zadané parametry.

Menší nevýhodou generování výsledků je číselné označení výsledků a absence toto označení změnit například na jmenovité označení dané přípojnice, na které se nachází zkrat. Číslování navíc začíná od nuly, takže je přiřazování výsledků k dané přípojnici značně nepřehledné.

Simulace sítě v Pandapower

Jak již bylo řečeno dříve, elektrická síť v programu Pandapower se vytváří pomocí textových příkazů uvedených v návodu programu (www.pandapower.readthedocs.io). Pro výpočet maximálního zkratového proudu pro každou přípojnicí slouží příkaz: `sc.calc_sc(net, fault="3ph", case="max")` a pro výpočet minimálního zkratového proudu příkaz: `sc.calc_sc(net, fault="3ph", case="min")`.

Celý kód pro simulaci sítě a výpočet zkratových proudů je uveden v příloze 1. Změnu uspořádání sítě (změna zapojení generátorů do přípojnice 1 nebo přípojnice 2) lze provést pomocí nasimulovaných přepínačů sw1 až sw15.

Logika spínání je zobrazena na obr. 19. Pokud je příkazu „closed“ přiřazen příkaz „False“, jako je tomu u spínače sw2, obvod je rozpojen a proud neprotéká. Pokud je příkazu „closed“ přiřazen příkaz „True“, jako je tomu u spínače sw3, obvod je spojen a proud protéká.

```
sw2 = pp.create_switch(net, bus=bus2, element=busswitchTG, et="b", type="DS", closed=False)
sw3 = pp.create_switch(net, bus=bus1, element=busswitchTG, et="b", type="DS", closed=True)
```

Obr. 19 Logika spínačů v programu Pandapower [14]

Na obr. 20 lze vidět výpis výsledků z programu Pandapower pro zapojení 1 (viz obr. 23) První sloupec představuje číslování přípojnic (číslování začíná od nuly), druhý sloupec představuje výsledné rázové zkratové proudy, třetí sloupec zkratový výkon, čtvrtý sloupec nárazový zkratový proud, pátý sloupec zkratový odpor a šestý sloupec představuje zkratovou

reaktanci. Nejdůležitější jsou řádky 0-4 (představující přípojnice 1-5), pro které budu porovnávat výsledné zkratové proudy (viz níže).

	ikss_ka	skss_mw	ip_ka	rk_ohm	xk_ohm	
0	32.333210	588.029003	83.939595	0.010021	0.205996	Bus 1
1	40.696134	740.121611	106.649635	0.007769	0.163674	Bus 2
2	7.637034	1455.050408	19.070055	0.799246	9.112466	Bus 3
3	22.634280	235.222342	59.375168	0.008006	0.168161	Bus 4
4	25.056858	260.398504	65.733836	0.007692	0.151880	Bus 5
5	7.497274	1428.422596	18.631865	0.848830	9.279228	
6	7.511671	1431.165452	18.681255	0.842693	9.261855	
7	39.606833	720.311001	103.171260	0.009686	0.168086	
8	3.207134	58.326646	8.229218	0.053220	2.078557	
9	31.374697	570.596968	80.289708	0.012653	0.212164	
10	3.207134	58.326646	8.229218	0.053220	2.078557	

Obr. 20 Výpis výsledků z programu Pandapower

4.3 Výpočet zkratu pomocí programu PSP-UFU

Jako jeden z mála je PSP-UFU program pro výpočet zkratových poměrů pracující s grafickým rozhraním a je volně ke stažení. To však sebou nese pár výhod, ale i nevýhod.

Největší výhodou je jednoznačně jednoduchost práce s programem. Prostředí programu je velice přehledné a téměř každý bez jakéhokoliv návodu dokáže vytvořit menší elektrickou síť. Také práce s jednotlivými komponenty je velice intuitivní. U prvků sítě lze navíc nějaké parametry komponentu zadávat v různých jednotkách, takže se nemusí parametry zdlouhavě přepočítávat.

Nevýhody programu mírně převyšují výhody. Značná jednoduchost programu přináší na druhou stranu absenci některých důležitých funkcí. Program nepočítá dle aktuální normy pro výpočet zkratových proudů v trojfázové síti ČSN EN 60909-0, takže výsledky jsou zkreslené. Dále je velmi omezená četnost parametrů, které je možno přiřadit jednotlivému prvku. Omezená je i četnost samotných prvků elektrické sítě, například nelze simulovat trojvinuťový transformátor, takže se musí přepočítat parametry a nahradit jej pomocí tří dvouvinuťových transformátorů. Podrobnosti o náhradě trojvinuťového transformátoru viz níže.

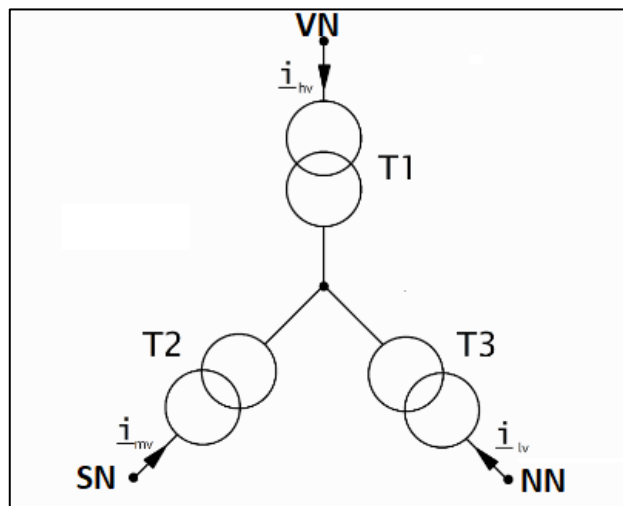
Instalace samotného programu je velmi jednoduchá. Stačí jen stáhnout instalační program, ten spustit a za pár vteřin je hotovo.

Vygenerování výsledku je velice rychlé, avšak nejprve je třeba vybrat u určité přípojnice, že na ní vznikl zkrat a až poté lze vygenerovat výsledek. Výsledky tedy nejsou generovány hromadně, ale pouze pro vybrané přípojnice. To může být při rozsáhlé elektrické síti nevyhovující a značně to zpomalí celý proces získávání výsledků.

Bohužel popis, jak program PSP-UFU pracuje s elektrickou sítí a podle jakých vzorců počítá pro jednotlivé komponenty sítě zkratové impedance a výsledný zkratový proud, téměř není k nalezení.

Simulace trojvlnutového transformátoru v PSP-UFU

Jelikož v programu PSP-UFU nelze simulovat trojvlnutový transformátor, jak již bylo řečeno dříve, rozhodl jsem se ho nahradit třemi dvojnvnutovými transformátory podle způsobu, jak ho nahrazuje pro výpočet software Pandapower. Schéma zapojení těchto dvojnvnutových transformátorů je znázorněno na obr. 21.



Obr. 21 Schéma zapojení tří dvojnvnutových transformátorů [9]

Hodnoty napětích a výkonů náhradních transformátorů:

- Náhradní transformátor T1:
 - $U_{nT1,P}/U_{nT1,S} = 110/110 \text{ kV}$
 - $S_{nT1} = 65 \text{ MVA}$
 - Turns ratio = 1,1
- Náhradní transformátor T2:
 - $U_{nT2,P}/U_{nT2,S} = 110/10,5 \text{ kV}$

- $S_{nT2} = 65 \text{ MVA}$
- Turns ratio = 1,0
- Náhradní transformátor T3:
 - $U_{nT3,P}/U_{nT3,S} = 110/6,3 \text{ kV}$
 - $S_{nT1} = 25 \text{ MVA}$
 - Turns ratio = 1,0

Pro dosažení jmenovitého napětí na primární straně transformátoru je potřeba v programu PSP-UFU zadat do parametrů transformátoru ještě hodnotu „Turns ratio“, která je ve výchozím stavu nastavena na hodnotu 1,0 (to představuje 100% dané hodnoty). Tato hodnota navyšuje/snižuje původní fiktivní hodnotu napětí o dané procento. V případě náhradního transformátoru T1 je fiktivní napětí 110 kV a po přepsání parametru „Turns ratio“ z hodnoty 1,0 na 1,1 dojde k navýšení napětí na primární straně o 10 %, tedy na hodnotu 121 kV.

Parametry pro přepočítání hodnot trojvlnového transformátoru, které jsou převzaty z podkapitoly Požadované vstupní hodnoty pro Pandapower, jsou vypsané v tabulce 6.

Tabulka 6 Parametry k náhradě trojvlnového transformátoru

Strany vnutří trojvlnového transformátoru	VN-SN	SN-NN	VN-NN
Poměrné napětí nakrátko (%)	12,5 (ref. výkon 65 MVA)	5,5 (ref. výkon 25 MVA)	11 (ref. výkon 25 MVA)
Reálná část napětí nakrátko (%)	0,488 (ref. výkon 65 MVA)	0,392 (ref. výkon 25 MVA)	0,436 (ref. výkon 25 MVA)

Vstupní hodnoty potřebné pro dvojitvlnový transformátor v programu PSP-UFU jsou napětí nakrátko a reálná část napětí nakrátko. Pro jednotlivé dvojitvlnové transformátory jsem přepočítal parametry z tabulky 6 pomocí následujících rovnic pro výpočet napětí nakrátko a reálných částí napětí nakrátko.

$$u'_{k,VN-SN} = u_{k,T1\%} * \frac{S_{n,T1}}{S_{n,T1}} = 12,5 * \frac{65}{65} = 12,5 \% \quad (4.50)$$

$$u'_{k,SN-NN} = u_{k,T2\%} * \frac{S_{n,T1}}{S_{n,T3}} = 5,5 * \frac{65}{25} = 14,3 \% \quad (4.51)$$

$$u'_{k,VN-NN} = u_{k,T3\%} * \frac{S_{n,T1}}{S_{n,T3}} = 11 * \frac{65}{25} = 28,6 \% \quad (4.52)$$

(pozn. přepočítání poměrných napětí nakrátko na stejný výkon)

$$u'_{k,T1} = \frac{1}{2}(u'_{k,VN-SN} + u'_{k,VN-NN} - u'_{k,SN-NN}) = \frac{1}{2}(12,5 + 28,6 - 14,3) = 13,4 \% \quad (4.53)$$

$$u'_{k,T2} = \frac{1}{2}(u'_{k,VN-SN} + u'_{k,SN-NN} - u'_{k,VN-NN}) = \frac{1}{2}(12,5 + 14,3 - 28,6) = -0,9 \% \quad (4.54)$$

$$u'_{k,T3} = \frac{1}{2}(u'_{k,VN-NN} + u'_{k,SN-NN} - u'_{k,VN-SN}) = \frac{1}{2}(28,6 + 14,3 - 12,5) = 30,4 \% \quad (4.55)$$

$$u_{k,T1} = u'_{k,T1} = 13,4 \% \quad (4.56)$$

$$u_{k,T2} = u'_{k,T2} = -0,9 \% \quad (4.57)$$

$$u_{k,T3} = u'_{k,T3} * \frac{S_{n,T3}}{S_{n,T1}} = 30,4 * \frac{25}{65} = 11,69 \% \quad (4.58)$$

(pozn. výsledné napětí nakrátko dvojnásobných transformátorů přepočtené zpět na referenční výkony)

$$r'_{k,VN-SN} = r_{k,T1\%} * \frac{S_{n,T1}}{S_{n,T1}} = 0,488 * \frac{65}{65} = 0,488 \% \quad (4.59)$$

$$r'_{k,SN-NN} = r_{k,T2\%} * \frac{S_{n,T1}}{S_{n,T3}} = 0,392 * \frac{65}{25} = 1,0192 \% \quad (4.60)$$

$$r'_{k,VN-NN} = r_{k,T3\%} * \frac{S_{n,T1}}{S_{n,T3}} = 0,436 * \frac{65}{25} = 1,1336 \% \quad (4.61)$$

(pozn. přepočítání reálných částí poměrných napětí nakrátko na stejný výkon)

$$\begin{aligned} r'_{k,T1} &= \frac{1}{2}(r'_{k,VN-SN} + r'_{k,VN-NN} - r'_{k,SN-NN}) = \\ &= \frac{1}{2}(0,488 + 1,1336 - 1,0192) = 0,6024 \% \end{aligned} \quad (4.62)$$

$$r'_{k,T2} = \frac{1}{2}(r'_{k,VN-SN} + r'_{k,SN-NN} - r'_{k,VN-NN}) =$$

$$= \frac{1}{2}(0,488 + 1,0192 - 1,1336) = -0,3736 \% \quad (4.63)$$

$$r'_{k,T3} = \frac{1}{2}(r'_{k,VN-NN} + r'_{k,SN-NN} - r'_{k,VN-SN}) =$$

$$= \frac{1}{2}(1,1336 + 1,0192 - 0,488) = 1,6648 \% \quad (4.64)$$

$$r_{k,T1} = r'_{k,T1} = 0,6024 \% \quad (4.65)$$

$$r_{k,T2} = r'_{k,T2} = -0,3736 \% \quad (4.66)$$

$$r_{k,T3} = r'_{k,T3} * \frac{S_{n,T3}}{S_{n,T1}} = 1,6648 * \frac{25}{65} = 0,6403 \% \quad (4.67)$$

(pozn. výsledné reálné části napětí nakrátko dvojinuťových transformátorů přepočtené zpět na referenční výkon) [9]

Vypočtená napětí nakrátko a reálné části napětí nakrátko k náhradě trojvinuťového transformátoru jsou uvedeny v tabulce 7.

Tabulka 7 Přehled dopočtených hodnot pro náhradu trojvinuťového transformátoru

Náhradní dvojinuťový transformátor	T1	T2	T3
Jmenovitý výkon (MVA)	65	65	25
Poměrné napětí nakrátko (%)	13,4 (ref. výkon 65 MVA)	-0,9 (ref. výkon 65 MVA)	11,69 (ref. výkon 25 MVA)
Reálná část napětí nakrátko (%)	0,6024 (ref. výkon 65 MVA)	-0,3736 (ref. výkon 65 MVA)	0,6403 (ref. výkon 25 MVA)

Simulace sítě v PSP-UFU

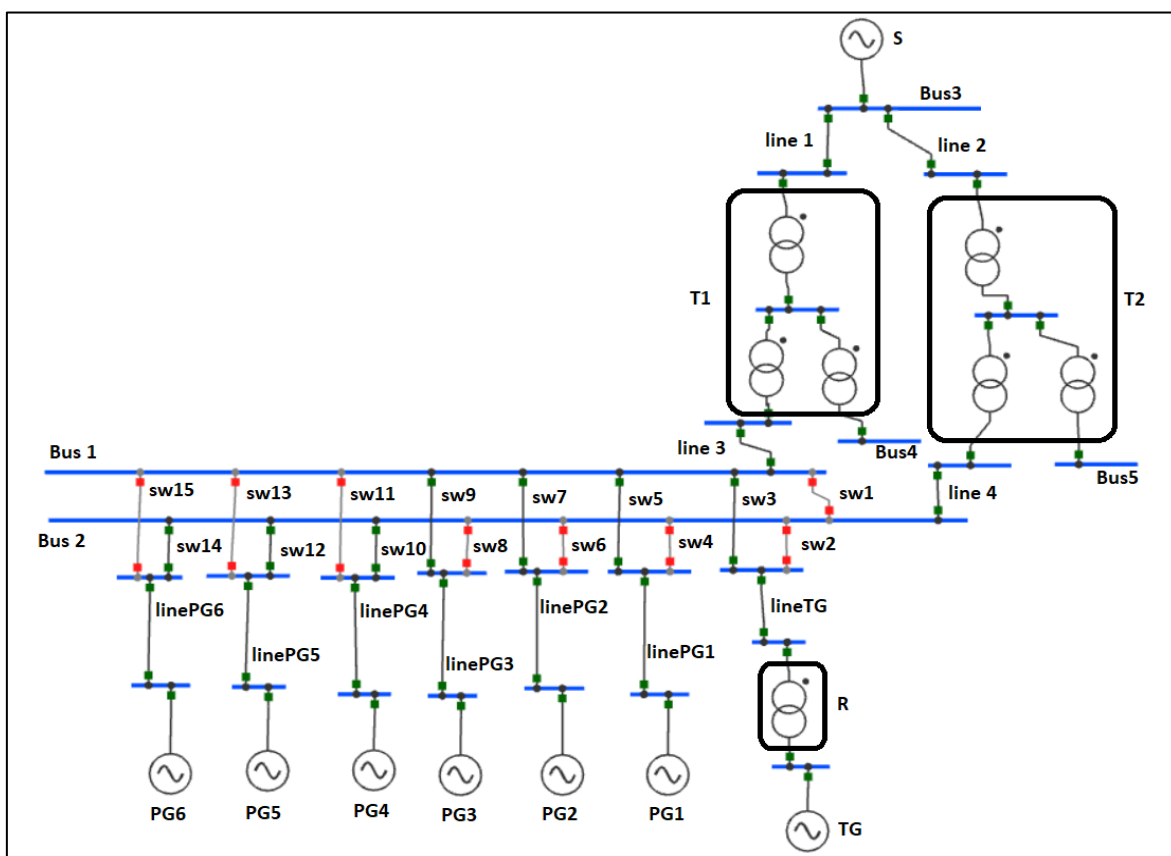
Pro vytvoření elektrické sítě stačí vybrat dané prvky elektrické sítě z nabídky a propojit je pomocí vodičů. Jednotlivé parametry k prvku pak lze přiřadit v okně prvku, které se otevře dvojklikem na prvek. Pro přiřazení zkratu na přípojnici je třeba v okně přípojnice zaškrtnout v záložce „Fault“ políčko „Insert fault in the bus“. Pak se musí přiřadit přípojnici textové pole, pro které si lze vybrat, jestli chceme zobrazit zkratový proud nebo zkratový výkon. Dále již stačí pro výpočet v záložce „Simulation“ kliknout na „Fault“.

Jelikož je program PSP-UFU jednodušší a nelze v něm nastavovat mnoho parametrů co se týče výpočtu zkratu, je tedy nutné brát v potaz tyto nedostatky při generování výsledků.

Specifika výpočtu zkratu programem PSP-UFU:

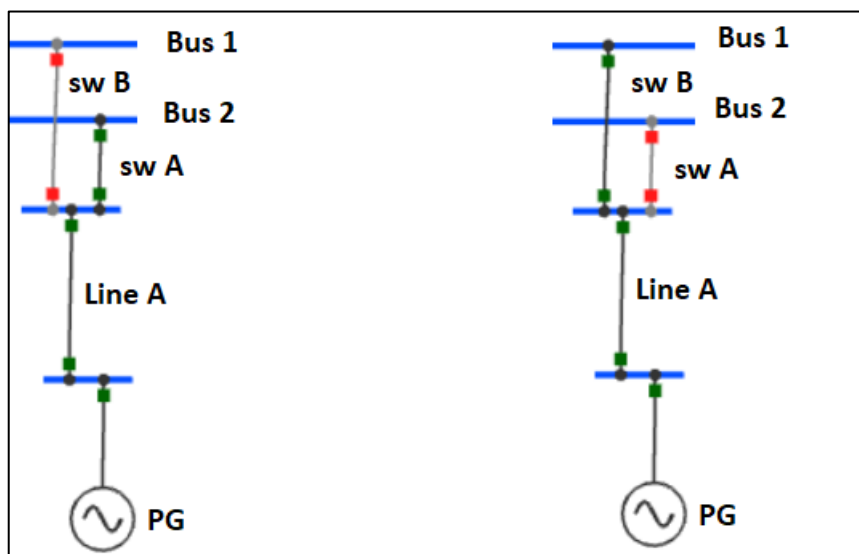
- Program bere součinitel napětí pro výpočet zkratového proudu $c=1$, pro výpočet maximálního zkratového proudu je tedy nutné vynásobit výsledný zkratový proud součinitelem napětí pro výpočet maximálního zkratového proudu c_{max} , tedy konstantou 1,1.
- Program ve výpočtu nebere v úvahu korekční koeficienty
- Transformátoru nelze přímo zadat jeho jmenovité napětí. Pro získání jmenovitého napětí se musí v okně transformátoru v poličku „Turns ratio“ zadat procentuální navýšení/snížení jeho fiktivního napětí.
- V programu nelze pro zkrat zobrazit zkratovou impedanci ani její reálnou a imaginární složku, což může být limitující k výpočtu nárazového zkratového proudu a ekvivalentního oteplovacího zkratového proudu.

Celá elektrická síť vytvořená v programu PSP-UFU je vyobrazena na obr. 22. Změnu uspořádání sítě (změna zapojení generátorů do přípojnice 1 nebo přípojnice 2) lze provést pomocí nasimulovaných spínačů sw1 až sw15.



Obr. 22 Vytvořená elektrická síť v programu PSP-UFU

Na obr. 23 je vyobrazeno připojení generátoru PG do přípojníc Bus 1 a Bus 2 přes spínače sw A a sw B. Na levé straně obrázku je sw A spojen (naznačeno zelenou barvou) a sw B rozpojen (naznačeno červenou barvou). Průchozí proud tedy prochází přes spínač sw A a generátor PG je připojen do přípojnice Bus 2. Na pravé straně obrázku je vyobrazen případ opačný, kdy je sw A rozpojen a sw B spojen. V tomto případě je generátor PG připojen do přípojnice Bus1.



Obr. 23 Ukázka zapojení spínačů [12]

4.4 Vyhodnocení výsledných zkratových proudů pro srovnávací zapojení

V této podkapitole se zabývám porovnáním výsledných maximálních rázových zkratových proudů získaných z programů Pandapower, PSP-UFU a z ručního výpočtu pro zapojení, které je zobrazeno na obr. 5, tj. TG, PG1, PG2, PG3 zapojené do přípojnice 1 a PG4, PG5, PG6 zapojené do přípojnice 2. Ruční výpočty zkratových poměrů pro toto zapojení mi sloužily jako srovnávací výpočty pro odladění simulace elektrické sítě v programech.

Tabulka 8 Srovnání výsledků zkratových proudů pro srovnávací zapojení [12] [13]

Vypočtené hodnoty I''_{k3fmax} (kA)				
Přípojnice	Ruční výpočet	Pandapower	PSP-UFU	PSP-UFU * C_{max}
Bus 1 (10,5 kV)	44,751	44,749	40,306	44,337

Ze srovnání výsledků z tabulky 8 lze říct, že výsledky zkratového proudu z ručního výpočtu a z výpočtu pomocí Pandapower jsou téměř totožné, takže program Pandapower opravdu provádí výpočet podle ČSN EN 60909-0 a dá se považovat pro výpočet za velmi přesný. Výsledek z programu PSP-UFU vynásobený napěťovým součinitelem c_{max} pro výpočet maximálního zkratového proudu, se liší od ručního výpočtu asi o 0,415 kA, což znamená chybu cca 0,93 %. Na to, jak je program jednoduchý na používání a mnoho funkcí pro výpočet je v něm značně omezeno, lze považovat chybu 0,93 % (způsobená tím, že program nezahrnuje do výpočtu korekční koeficienty) za velmi dobrý výsledek a lze v tomto případě program PSP-UFU považovat jako vhodný pro výpočet.

Rozvodna je osazena vakuovými vypínači VD4. Na straně generátorů jsou vypínače s označením p210 12.12.50 se jmenovitou vypínací schopností $I_{vyp_{50}} = 50 \text{ kA}$ a na straně sekundární strany transformátoru jsou vypínače s označením p275 12.40.40 se jmenovitou vypínací schopností $I_{vyp_{40}} = 40 \text{ kA}$. Technické specifikace vypínačů jsou zobrazeny na obr. 27.

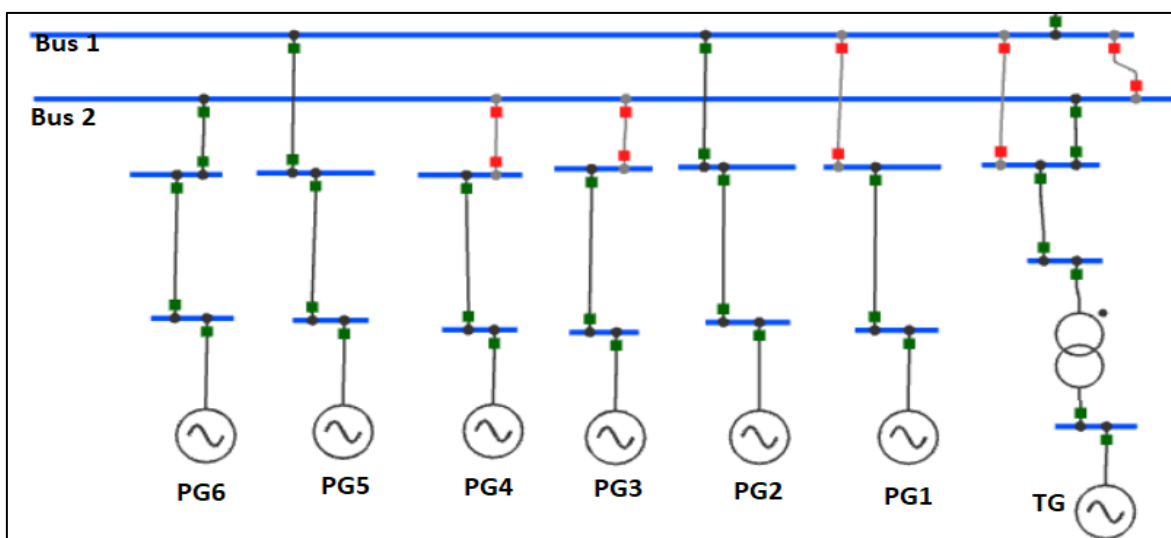
5.2 Porovnání výsledných zkratových proudů pro různá zapojení

V současné době je provozní stav zapojení generátorů do přípojnic následující:

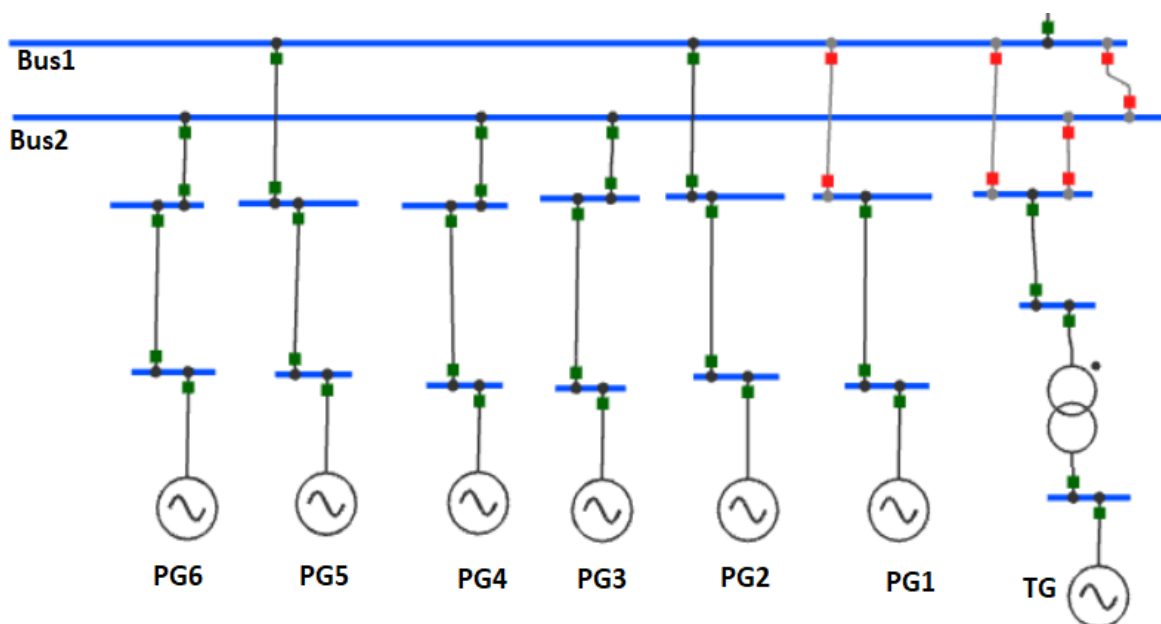
- Do přípojnice 1 je připojen: PG1, PG2 a PG5
- Do přípojnice 2 je připojen: PG3, PG4 a PG6

S tím že generátor TG se přepojuje mezi přípojnicí 1 a 2 dle potřeby.

Za současného stavu provozu spolu zároveň pracují maximálně generátory TG, PG5, PG6 a jeden z generátorů PG1-4 (zapojení je znázorněno na obr. 25) nebo jakýchkoliv 5 generátorů PG bez připojení TG (zapojení je znázorněno na obr. 26) .



Obr. 25 Zapojení 1 - současné zapojení generátoru s provozem TG [12]



Obr. 26 Zapojení 2 - současné zapojení generátoru bez provozu TG [12]

S přihlédnutím na tyto provozní stavy, které představují maximální možný počet zapojených generátorů do sítě, má smysl porovnávat zkratové poměry pro současný a budoucí stav jen pro určitá zapojení generátorů.

Pro každé zapojení porovnávám výsledný maximální rázový zkratový proud $I''_{k3f_{max}}$ získaný z programu Pandapower pro současný stav externí sítě a pro výhledový stav externí sítě (po roce 2025). Navíc pro výhledový stav externí sítě (po roce 2025) uvádím i nárazový zkratový proud i_p a ekvivalentní oteplovací proud I_{th} , které využiji v kapitole 5.3 ke kontrole na účinky zkratových proudů. Minimální hodnoty zkratových proudů nejsou v tomto případě pro kontrolu rozvodny na účinky zkratových proudů potřeba, proto je ani neuvádím.

Následující vzorové výpočty zkratových proudů jsou vypočítány pro přípojnici 2 v zapojení 1 (obr. 25). Výpočet pro přípojnici 1 a ostatní zapojení je obdobný a všechny mezi výpočty jsou uvedeny v tabulce excel (soubor pod názvem Porovnání zkratových proudů, který je uveden v příložených přílohách). Hodnoty i_p a I_{th} pro rozvodny 110 kV a 6,3 kV uvedeny nejsou z důvodu nedostatku informací o rozvodnách, a navíc hodnoty maximálních rázových proudů na rozvodnu 6,3 kV pro současný a budoucí stav se liší jen velmi málo.

Vzorový výpočet nárazového zkratového proudu i_p pro přípojnici 2 v zapojení 1

Pro výpočet nárazového zkratového proudu podle ČSN EN 60909-0, jsem nejprve pomocí programu Padnapower vypočítal pro zkrat na přípojnici 2 v zapojení 1 maximální rázový zkratový proud $I''_{k3fmax} = 40,696 \text{ kA}$. S tímto výsledkem program vygeneroval i reálnou složku zkratové impedance $R = 0,007769 \Omega$ a imaginární složku zkratové impedance $X = 0,163674 \Omega$.

Dále je potřeba vypočítat součinitel κ :

$$\kappa = 1,02 + 0,98 * e^{-3 * \frac{R}{X}} = 1,02 + 0,98 * e^{-3 * \frac{0,007769}{0,163674}} = 1,86993 \quad (5.1)$$

(Poměr $\frac{R}{X}$ je poměr hodnot zkratového odporu a zkratové reaktance. Tyto hodnoty lze získat z programu Pandapower)

Následně je možno vypočítat samotný nárazový zkratový proud z rázového zkratového proudu.

$$i_p = \kappa * \sqrt{2} * I''_{k3fmax} = 1,86993 * \sqrt{2} * 40,696 = 107,62 \text{ kA} \quad (5.2)$$

Proud i_p lze také získat z programu Pandapower, který ho vypočítá s dostatečnou přesností.

Vzorový výpočet ekvivalentního oteplovacího zkratového proudu I_{th} pro přípojnici 2 v zapojení 1

Ekvivalentní oteplovací zkratový proud se vypočítá z rázového zkratového proudu následně:

$$I_{th} = I''_{k3fmax} * \sqrt{m + n} \text{ (kA)} \quad (5.3)$$

Pro výpočet je tedy potřeba určit součinitele pro tepelné účinky stejnosměrné složky m a součinitele pro tepelné účinky střídavé složky n :

$$m = \frac{1}{2 * f * T_k * \ln(\kappa - 1)} * [e^{4 * f * T_k * \ln(\kappa - 1)} - 1] =$$

$$= \frac{1}{2 * 50 * 0,105 * \ln(1,86993 - 1)} * [e^{4 * 50 * 0,105 * \ln(1,86993 - 1)} - 1] = 0,646846 \quad (5.4)$$

Hodnotu κ jsem získal z rovnice 5.1 a hodnotu T_k jsem dostal jako součet nastavení ochran (viz obr. 27) a nejvyššího celkového času přerušení zkratového proudu vypínačem převzatého z technických specifikací vypínače (viz obr. 28). V tomto případě se tedy jedná o maximální doby, protože dimenzuji rozvodnu na tepelné účinky.

$$T_k = 0,030 + 0,075 = 0,105 \text{ s} \quad (5.5)$$

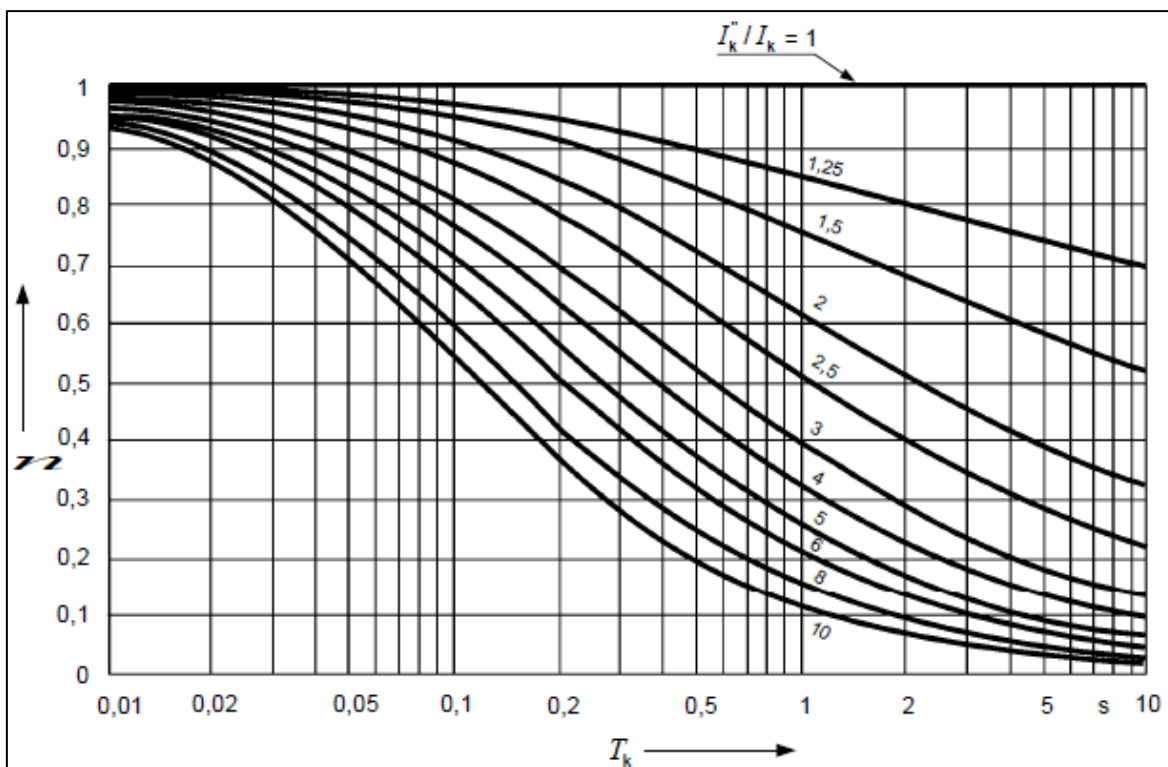
Fáze	Nastavená hodnota $I > [\text{pu}]$	Vypočtená hodnota $I [\text{A}]$	Měřená hodnota $I [\text{A}]$		Nastavená hodnota $I [\text{A}]$	Nastavená hodnota $t [\text{s}]$	Měřená hodnota $t [\text{s}]$
			Náběh	Odpad			
L1	7,0	6,02	6,092	5,790	9,0	0,02	0,030
L2			6,035	5,795			0,027
L3			6,043	5,777			0,025

Obr. 27 Nastavení ochran rozvodny 10,5 kV

Circuit breaker			
Standards	IEC 62271-100		
Rated voltage	Ur [kV]		
Rated insulation voltage	Us [kV]		
Withstand voltage at 50 Hz	Ud (1 min) [kV]		
Impulse withstand voltage	Up [kV]		
Rated frequency	fr [Hz]		
Rated thermal current (40 °C)	Ir [A]	1250	1250
Rated breaking capacity (rated symmetrical short-circuit current)	Isc [kA]	-	-
		40	-
		-	50
Admissible rated short-time withstand current (3s)	Ik [kA]	-	-
		40	-
Making capacity	Ip [kA]	-	-
		100	-
		-	125
Opening time	[ms]	33 ... 60	33 ... 60
Arcing time	[ms]	10 ... 15	10 ... 15
Total breaking time	[ms]	43 ... 75	43 ... 75
Closing time	[ms]	30 ... 60	30 ... 60

Obr. 28 Technické specifikace vypínačů v rozvodně 10,5 kV

Pro získání součinitele n je nejprve potřeba vypočítat poměr $\frac{I''_{k3fmax}}{I_{kmax}}$ a poté z grafu na obr. 29 určit součinitel n ,


 Obr. 29 Určení součinitele n pro tepelný účinek střídavé složky zkratového proudu [11]

kde $I_{k_{max}}$ je maximální ustálený zkratový proud vypočítaný následovně:

Pro synchronní generátory se $I_{kG_{max}}$ vypočítá pomocí rovnice 5.6 (v případě zapojení 1, počítám $I_{kG_{max}}$ pro generátory TG a PG6 (v tomto případě počítám oba generátory jako skupinu, tedy беру oba generátory jako jeden generátor, zdůvodnění viz níže),

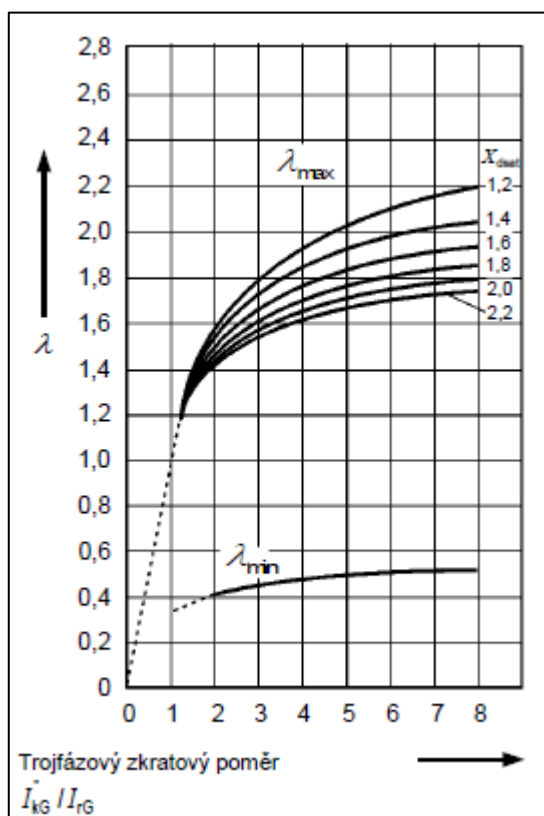
$$I_{kG_{max}} = \lambda_{max} * I_{rG} \text{ (kA)} \quad (5.6)$$

kde se součinitel λ_{max} určí z obr. 30 na základě trojfázového zkratového poměru $\frac{I''_{kG}}{I_{rG}}$ a nasycené reaktance x_{dsat} , což je převrácená hodnota syceného zkratového poměru naprázdno. [11]

Pro výpočet poměru $\frac{I''_{kG}}{I_{rG}}$ uvedeném v rovnici 5.7, získám hodnotu I''_{kG} pomocí programu Pandapower, kdy nechám připojené jen generátory TG a PG6 a poté z výsledných hodnot zkratových proudů vyberu hodnotu pro přípojnicí 2, v tomto případě je $I''_{kG} = 17,529 \text{ kA}$. Hodnota I_{rG} je součet jmenovitých proudů generátorů TG a PG6 dostupných z technický specifikací na obr. 10 a obr. 12.

$$\frac{I''_{kG}}{I_{rG}} = \frac{I''_{kG}}{I_{rTG} + I_{rPG6}} = \frac{17,529}{1,540 + 0,789} = 7,526 \quad (5.7)$$

Pro určení hodnoty x_{dsat} není dostatek vstupních hodnot. Pro generátor PG6 je dostupná jen nenasycená reaktance x_{dunsat} (dostupná na obr. 12 značená jako XD (U)) a pro generátor není dostupná ani jedna z hodnot, proto jsem určil hodnotu pro oba generátory $x_{dsat} = 1,8$ jako průměrnou hodnotu x_{dsat} dostupnou pro jiné generátory podobných výkonů.



Obr. 30 Určení součinitele λ_{max} pro stroje s hladkým rotorem [11]

Z obr. 30 jsem odečetl, že $\lambda_{max} = 1,85$ a nyní můžu vypočítat $I_{kG_{max}}$.

$$\begin{aligned} I_{kG_{max}} &= \lambda_{max} * I_{rG} = \lambda_{max} * (I_{rTG} + I_{rPG6}) = \\ &= 1,85 * (1,540 + 0,789) = 4,309 \text{ kA} \end{aligned} \quad (5.8)$$

Pro síťový napáječ (vzdálený zkrat) se $I_{kS_{max}}$ vypočítá pomocí rovnice 5.9. V tomto případě pro zapojení 1 lze brát generátory PG2 a PG5 zapojené do přípojnice 1 jako součást síťového

napaječe, protože jejich zkratový proud prochází do zkratu přes 2 transformátory T1 a T2 a lze tak pro ně uvažovat, že se jedná o vzdálený zkrat.

$$I_{kS_{max}} = I''_{kS_{max}} = 23,170 \text{ kA} \quad (5.9)$$

(Hodnotu $I''_{kS_{max}}$ jsem získal z programu Pandapower.)

Poté je celkový ustálený zkratový proud $I_{kS_{max}}$ v případě zkratů napájených z nezauzlené sítě vypočítán následovně: [11]

$$I_{k_{max}} = I_{kG_{max}} + I_{kS_{max}} = 4,30865 + 23,170 = 27,479 \text{ kA} \quad (5.10)$$

Nyní mohu vypočítat poměr $\frac{I''_{k3f_{max}}}{I_{k_{max}}}$

$$\frac{I''_{k3f_{max}}}{I_{k_{max}}} = \frac{40,696}{27,479} = 1,481 \quad (5.11)$$

a následně jsem z obr. 29 získal hodnotu součinitele $n=0,95$.

Teď již lze vypočítat ekvivalentní oteplovací zkratový proud.

$$I_{th} = I''_{k3f_{max}} * \sqrt{m + n} = 40,696 * \sqrt{0,646846 + 0,95} = 51,426 \text{ kA} \quad (5.12)$$

Nakonec ještě výsledný I_{th} pře počítám na referenční hodnotu $T_k = 1 \text{ s}$ pomocí následující rovnice.

$$I_{th,1} = I_{th} * \sqrt{T_k} = 51,426 * \sqrt{0,105} = 16,664 \text{ kA} \quad (5.13)$$

Vzorový výpočet souměrného vypínacího proudu I_b pro vypínač generátoru PG6 v zapojení 1

Pro výpočet tohoto případu by nastal zkrat za vypínačem generátoru PG6 na straně ke generátoru PG6. Samotný generátor PG6 v tomto případě do výpočtu vůbec nezahrnuji,

protože jeho příspěvek zkratového proudu do zkratu neprochází přes vypínač generátoru PG6 a tedy neovlivní souměrný vypínací proud procházející přes vypínač.

Souměrný vypínací proud synchronních generátorů se vypočítá pomocí součinitele μ následovně:

$$I_{bG} = \mu * I''_{kGmax} \quad (5.14)$$

Hodnoty součinitele μ určíme podle následujících vztahů: [11]

$$\mu = 0,84 + 0,26e^{-0,26 * \frac{I''_{kGmax}}{I_{rG}}} \quad \text{pro } t_{min} = 0,02 \text{ s} \quad (5.15)$$

$$\mu = 0,71 + 0,51e^{-0,30 * \frac{I''_{kGmax}}{I_{rG}}} \quad \text{pro } t_{min} = 0,05 \text{ s} \quad (5.16)$$

$$\mu = 0,62 + 0,72e^{-0,32 * \frac{I''_{kGmax}}{I_{rG}}} \quad \text{pro } t_{min} = 0,10 \text{ s} \quad (5.17)$$

$$\mu = 0,56 + 0,94e^{-0,38 * \frac{I''_{kGmax}}{I_{rG}}} \quad \text{pro } t_{min} \geq 0,25 \text{ s} \quad (5.18)$$

(Pokud není poměr $\frac{I''_{kGmax}}{I_{rG}}$ větší než 2, platí $\mu = 1$ pro všechny hodnoty t_{min} .) [11]

Hodnotu t_{min} jsem dostal jako součet nastavení ochran (viz obr. 27) a nejnižšího celkového času přerušování zkratového proudu vypínačem převzatého z technických specifikací vypínače (viz obr. 28).

$$t_{min} = 0,025 + 0,043 = 0,068 \text{ s} \quad (5.19)$$

Protože hodnota t_{min} vyšla mezi hodnotami $0,05 \text{ s}$ a $0,10 \text{ s}$, rozhodl jsem se vypočítat součinitel μ podle rovnice 5.16 pro $t_{min} = 0,05$. Tato rovnice ve výsledku dá větší výsledný souměrný vypínací proud než rovnice 5.17 pro $t_{min} = 0,10 \text{ s}$.

$$\begin{aligned} \mu &= 0,71 + 0,51e^{-0,30 * \frac{I''_{kGmax}}{I_{rG}}} = 0,71 + 0,51e^{-0,30 * \frac{I''_{kG}}{I_{rTG}}} = \\ &= 0,71 + 0,51e^{-0,30 * \frac{11,824}{1,54}} = 0,76096 \end{aligned} \quad (5.20)$$

Hodnotu I''_{kGmax} jsem dostal z programu Pandapower (pro tento případ počítám I''_{kGmax} jen pro zapojený generátor TG, protože generátor PG6 se na souměrném vypínacím proudu

pro vypínač generátoru PG6 nepodílí a generátory připojené na přípojnici 1 lze brát jako součást síťového napáječe, protože jejich zkratový proud prochází do zkratu přes 2 transformátory T1 a T2 a lze tak pro ně uvažovat, že se jedná o vzdálený zkrat).

Nyní lze vypočítat I_{bG} :

$$I_{bG} = \mu * I''_{kG_{max}} = 0,76096 * 11,824 = 8,998 \text{ kA} \quad (5.21)$$

Pro výpočet souměrného vypínacího proudu síťového napáječe (vzdáleného zkratu) lze využít rovnice 5.22. V tomto případě beru generátory PG2 a PG5 připojené na přípojnici jako vzdálený zkrat (zdůvodnění viz výše). [11]

$$I_{bS} = I''_{kS_{max}} = 23,170 \text{ kA} \quad (5.22)$$

(Hodnotu $I''_{kS_{max}}$ jsem získal z programu Pandapower.)

Nakonec pro výpočet celkové souměrného vypínacího proudu I_b lze využít rovnici 5.23. [11]

$$I_b = I_{bG} + I_{bS} = 8,395 + 23,170 = 32,168 \text{ kA} \quad (5.23)$$

Vzorový výpočet stejnosměrné složky zkratového proudu i_{DC} pro vypínač generátoru PG6 v zapojení 1

Pro výpočet tohoto případu by nastal zkrat za vypínačem generátoru PG6 na straně ke generátoru PG6.

Stejnosemnná složka zkratového proudu i_{DC} se vypočítá podle následující rovnice.

$$\begin{aligned} i_{DC} &= \sqrt{2} * I''_{k3f_{max}} * e^{-2*\pi*f*t_{min}*\frac{R}{X}} = \\ &= \sqrt{2} * 34,993 * e^{-2*\pi*50*0,063*\frac{0,009668}{0,190321}} = 18,107 \text{ kA} \end{aligned} \quad (5.24)$$

Výsledky pro zapojení 1, které je znázorněno na obr. 25 jsou uvedeny v tabulce 9 a 10.

Tabulka 9 Výsledné zkratové proudy pro zapojení 1 [13]

Vypočtené hodnoty				
Přípojnice	I''_{k3fmax} (kA) (současný stav)	I''_{k3fmax} (kA) (výhledový stav)	i_p (kA)	$I_{th;1}$ (kA)
Bus 1 (10,5 kV)	30,678	32,333	85,367	13,268
Bus 2 (10,5 kV)	38,897	40,696	107,620	16,664
Bus 3 (110 kV)	6,037	7,637	19,070	
Bus 4 (6,3 kV)	22,121	22,634	59,375	
Bus 5 (6,3 kV)	24,637	25,057	65,734	

Tabulka 10 Výsledné souměrné vypínací proudy pro vypínače generátorů a přípojnic v rozvodně 10,5 kV pro zapojení 1

Vypínač	I_b (kA)	I_{dc} (kA)
TG	27,553	14,730
PG2	27,818	15,014
PG5	26,067	13,095
PG6	32,168	18,107
Bus 1, Bus 2	22,630	9,758

Výsledky pro zapojení 2, které je znázorněno na obr. 26 jsou uvedeny v tabulce 11 a 12.

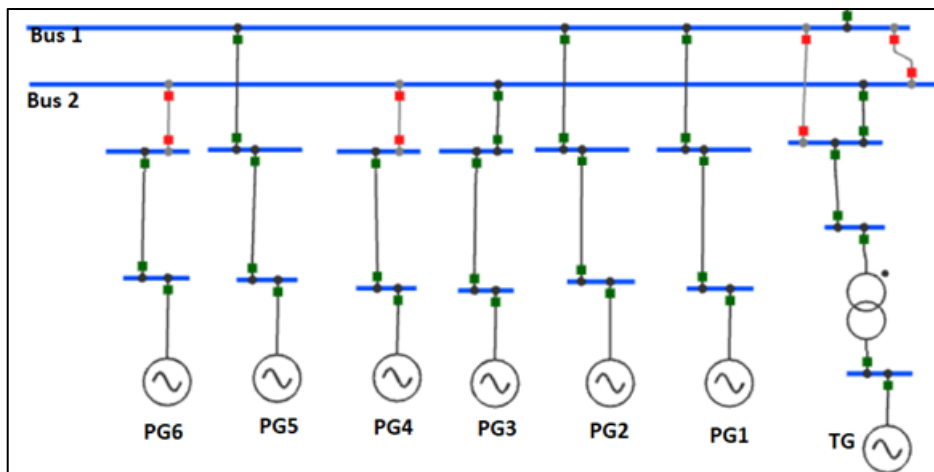
Tabulka 11 Výsledné zkratové proudy pro zapojení 2 [13]

Vypočtené hodnoty				
Přípojnice	I''_{k3fmax} (kA) (současný stav)	I''_{k3fmax} (kA) (výhledový stav)	i_p (kA)	$I_{th;1}$ (kA)
Bus 1 (10,5 kV)	30,424	32,158	83,392	13,181
Bus 2 (10,5 kV)	33,467	35,267	93,353	14,531
Bus 3 (110 kV)	5,837	7,437		
Bus 4 (6,3 kV)	22,040	22,581		
Bus 5 (6,3 kV)	23,052	23,554		

Tabulka 12 Výsledné souměrné vypínací proudy pro vypínače generátorů a přípojnic v rozvodně 10,5 kV pro zapojení 2

Vypínač	I_b (kA)	I_{dc} (kA)
PG2	27,643	14,812
PG3	30,195	17,186
PG4	30,194	17,176
PG5	25,892	12,898
PG6	28,445	15,273
Bus 1, Bus 2	22,630	9,758

Výsledky pro zapojení 3, které jsem navrhl jako náhradu zapojení 1, jsou uvedeny v tabulce 13 a 14. Samotné zapojení 3, kde na přípojnici 1 je zapojen generátor PG1, PG2, PG5 a na přípojnici 2 je zapojen generátor TG a PG3, je znázorněno na obr. 31.



Obr. 31 Zapojení 3 – Jedno z možných zapojení generátoru [12]

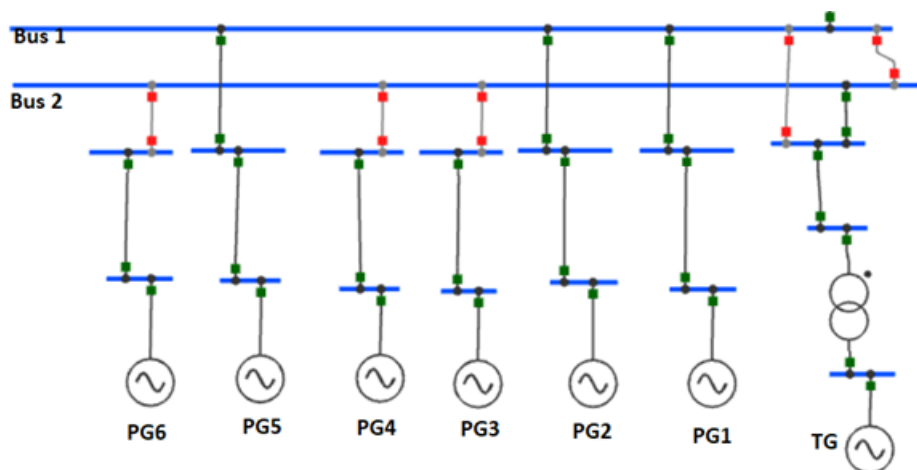
Tabulka 13 Výsledné zkratové proudy pro zapojení 3 [13]

Vypočtené hodnoty				
Přípojnice	$I''_{k3f_{max}} (kA)$ (současný stav)	$I''_{k3f_{max}} (kA)$ (výhledový stav)	$i_p (kA)$	$I_{th;1} (kA)$
Bus 1 (10,5 kV)	33,763	35,451	91,904	14,613
Bus 2 (10,5 kV)	36,579	38,319	100,624	15,683
Bus 3 (110 kV)	6,093	7,693		
Bus 4 (6,3 kV)	23,143	23,612		
Bus 5 (6,3 kV)	23,987	24,425		

Tabulka 14 Výsledné souměrné vypínací proudy pro vypínače generátorů a přípojníc v rozvodně 10,5 kV pro zapojení 3

Vypínač	$I_b (kA)$	$I_{dc} (kA)$
TG	25,937	13,029
PG1	30,382	17,349
PG2	30,381	17,340
PG3	32,298	18,291
PG5	28,627	15,391
Bus 1, Bus 2	22,630	9,758

Výsledky pro zapojení 4, které jsem navrhl jako další náhradu zapojení 1, jsou uvedeny v tabulce 15 a 16. Samotné zapojení 4, kde na přípojnici 1 je zapojen generátor PG1, PG2, PG5 a na přípojnici 2 je zapojen generátor TG, je znázorněno na obr. 32.



Obr. 32 Zapojení 4 – Jedno z možných zapojení generátoru [12]

Tabulka 15 Výsledné zkratové proudy pro zapojení 4 [13]

Vypočtené hodnoty				
Přípojnice	$I''_{k3fmax} (kA)$ (současný stav)	$I''_{k3fmax} (kA)$ (výhledový stav)	$i_p (kA)$	$I_{th;1} (kA)$
Bus 1 (10,5 kV)	33,602	35,340	91,593	14,553
Bus 2 (10,5 kV)	33,383	35,122	92,438	14,293
Bus 3 (110 kV)	5,968	7,568		
Bus 4 (6,3 kV)	23,097	23,583		
Bus 5 (6,3 kV)	23,018	23,506		

Tabulka 16 Výsledné souměrné vypínací proudy pro vypínače generátorů a přípojnic v rozvodně 10,5 kV pro zapojení 4

Vypínač	$I_b (kA)$	$I_{dc} (kA)$
TG	23,300	10,661
PG1	30,272	17,185
PG2	30,271	17,177
PG5	28,517	15,231
Bus 1, Bus 2	22,630	9,758

5.3 Vyhodnocení výsledků

Výsledné zkratové proudy pro různá zapojení je potřeba porovnat s výdržnými zkratovými proudy rozvodny.

5.3.1 Kontrola na dynamické účinky zkratových proudů

Zařízení je schopno odolat dynamickým účinkům zkratového proudu, pokud je jmenovitý dynamický výdržný proud zařízení vyšší než maximální vypočtený nárazový zkratový proud. Musí platit následující rovnice: [16]

$$i_{pR} \geq i_p \quad (5.25)$$

Při kontrole zapojení 1 lze vidět, že pro přípojnicí 2 výše uvedená rovnice, jak je naznačeno v rovnici 5.26, neplatí.

$$i_{pR} \geq i_p \rightarrow 100,000 \not\geq 107,620 \quad (5.26)$$

Při kontrole zapojení 2 lze vidět, že pro přípojnicí 1 i 2 výše uvedená rovnice, jak je naznačeno v rovnici 5.27, platí.

$$i_{pR} \geq i_p \rightarrow 100,000 \geq 91,353 \quad (5.27)$$

Při kontrole zapojení 3 lze vidět, že pro přípojnicí 2 výše uvedená rovnice, jak je naznačeno v rovnici 5.28, neplatí.

$$i_{pR} \geq i_p \rightarrow 100,000 \not\geq 100,624 \quad (5.28)$$

Při kontrole zapojení 4 lze vidět, že pro přípojnicí 1 i 2 výše uvedená rovnice, jak je naznačeno v rovnici 5.29, platí.

$$i_{pR} \geq i_p \rightarrow 100,000 \geq 92,438 \quad (5.29)$$

5.3.2 Kontrola na tepelné účinky zkratových proudů

Zařízení je schopno odolat tepelným účinkům zkratového proudu, pokud je jmenovitý krátkodobý výdržný proud zařízení vyšší než maximální vypočtený ekvivalentní oteplovací zkratový proud, přičemž oba z proudů musí být stanoveny pro stejný vypínací čas. Musí platit následující rovnice: [16]

$$I_{kR;1} \geq I_{th;1} \quad (5.30)$$

Při kontrole zapojení 1 lze vidět, že pro přípojnicí 1 i 2 výše uvedená rovnice, jak je naznačeno v rovnici 5.31, platí.

$$I_{kR;1} \geq I_{th;1} \rightarrow 40,000 \geq 16,664 \quad (5.31)$$

Při kontrole zapojení 2 lze vidět, že pro přípojnicí 1 i 2 výše uvedená rovnice, jak je naznačeno v rovnici 5.32, platí.

$$I_{kR;1} \geq I_{th;1} \rightarrow 40,000 \geq 14,531 \quad (5.32)$$

Při kontrole zapojení 3 lze vidět, že pro přípojnicí 1 i 2 výše uvedená rovnice, jak je naznačeno v rovnici 5.33, platí.

$$I_{kR;1} \geq I_{th;1} \rightarrow 40,000 \geq 15,683 \quad (5.33)$$

Při kontrole zapojení 4 lze vidět, že pro přípojnicí 1 i 2 výše uvedená rovnice, jak je naznačeno v rovnici 5.34, platí.

$$I_{kR;1} \geq I_{th;1} \rightarrow 40,000 \geq 14,553 \quad (5.34)$$

5.3.3 Kontrola na vypínací schopnosti vypínačů

Vypínač je schopen spolehlivě vypnout zkratový proud, pokud je jmenovitá vypínací schopnost vypínače vyšší než vypočtený souměrný vypínací proud a zároveň být vypínací schopnost vypínače vyšší než maximální hodnota stejnosměrné složky (stejnoseměrnou

složku jsem pro každé zapojení vypočetl, nicméně kontrolu na vypínací schopnost stejnosměrné složky jsem neprovedl, protože výrobce v technických specifikacích vypínače neuvádí vypínací schopnost pro stejnosměrnou složku). Musí platit následující rovnice. [16]

$$I_{vyp} \geq I_b \quad (5.35)$$

Při kontrole zapojení 1 lze vidět, že pro všechny vypínače výše uvedená rovnice, jak je naznačeno v rovnici 5.36, platí.

$$I_{vyp} \geq I_b \rightarrow 50,000 \geq 32,168 \quad (5.36)$$

Při kontrole zapojení 2 lze vidět, že pro všechny vypínače výše uvedená rovnice, jak je naznačeno v rovnici 5.37, platí.

$$I_{vyp} \geq I_b \rightarrow 50,000 \geq 30,195 \quad (5.37)$$

Při kontrole zapojení 3 lze vidět, že pro všechny vypínače výše uvedená rovnice, jak je naznačeno v rovnici 5.38, platí.

$$I_{vyp} \geq I_b \rightarrow 50,000 \geq 32,296 \quad (5.38)$$

Při kontrole zapojení 4 lze vidět, že pro všechny vypínače výše uvedená rovnice, jak je naznačeno v rovnici 5.39, platí.

$$I_{vyp} \geq I_b \rightarrow 50,000 \geq 30,272 \quad (5.39)$$

5.3.4 Doporučení pro provoz zdroje

Při zhodnocení všech kontrol pro zapojení 1, které představuje maximální možné zapojení generátorů pro současný stav, je patrné, že pro výhledový stav toto zapojení sice vyhovuje při kontrolách na tepelné účinky zkratových proudů a na vypínací schopnosti vypínačů, ale bohužel nevyhovuje kontrole na dynamické účinky zkratových proudů. Proto jsem navrhl zapojení 3 (které by pokrylo dokonce větší výkon než zapojení 1) jako náhradu za zapojení 1.

Bohužel zapojení 3 sice vyhovuje při kontrolách na tepelné účinky zkratových proudů a na vypínací schopnosti vypínačů, ale o kousek nevyhovuje kontrole na dynamické účinky zkratových proudů. Proto jsem navrhl ještě zapojení 4.

Zapojení 4 sice vyhovuje na všechny kontroly, ale nepokryje stejný výkon jako zapojení 1. Přesněji zapojení 1 pokryje výkon 68,382 MVA a zapojení 4 pokryje výkon 65,744. Zapojení 4 tedy pokryje o cca 2,6 MVA méně výkonu než zapojení 1.

Co se týče zapojení 2, které představuje současný stav zapojení generátorů PG, pokud je generátor TG odpojen, tak je patrné, že pro výhledový stav toto zapojení vyhovuje při všech kontrolách. Zapojení generátorů podle zapojení 2 je tedy možné provozovat bez omezení i pro výhledový stav sítě.

Zhodnocení a závěr

Cílem této diplomové práce bylo vybrat vhodný software, popř. více softwarů, pro výpočet zkratových poměrů a namodelovat v těchto softwarech elektrickou síť teplárny C-Energy Planá a vypočítat zkratové poměry. Dalším cílem bylo zhodnotit změnu vedení v přenosové soustavě, které napájí rozvodnu 110 kV teplárny C-Energy, z napěťové hladiny 220 kV na 400 kV a zejména vliv této změny napájení rozvodny 110 kV na zkratovou odolnost rozvodny 10,5 kV v teplárně C-Energy Planá a na provoz zdroje.

Z počátku práce uvádím přehled softwarů pro výpočet zkratových proudů v elektrických sítích a výběr těch vhodných podle požadavků provozovatele teplárny C-Energy. Jako nejvhodnější jsem vybral program PSP-UFU a program Pandapower.

Důležitou částí pro simulaci sítě v programech byla parametrizace jednotlivých komponentů sítě. Uvedl jsem jaké vstupní parametry daný program pro každý komponent požaduje a vypsals jsem pro ně hodnoty přímo z technických specifikací komponentů. Popřípadě jsem je dle potřeby přepočítal na vhodné parametry. Poté jsem nasimuloval danou elektrickou síť v obou programech, provedl výpočet zkratových proudů a ty porovnal s ručním výpočtem zkratového proudu podle normy ČSN EN 60909-0 pro určité zapojení generátorů. Výpočet pomocí programu Pandapower je velmi přesný podle normy, ale jeho hlavní nevýhoda je složitost práce s programem (veškerá simulace probíhá pomocí příkazů v příkazové řádce) a absence grafického rozhraní. Program PSP-UFU podle normy nepočítá, nicméně chyba výpočtu je velmi malá a také práce s programem je velice jednoduchá a intuitivní, a navíc nabízí grafické rozhraní.

Provedl jsem výpočet zkratových proudů pro současná zapojení generátorů pro stav před změnou a po změně přenosového vedení. Dále jsem zkratové proudy po změně přenosového vedení porovnal s výdržnými proudy rozvodny a určil jsem, jestli současná dvě zapojení generátorů bude možno provozovat. Z toho jedno zapojení (přípojnice 1 – PG2, PG5; přípojnice 2 – PG3, PG4, PG6) bude možno provozovat beze změny a druhé zapojení (přípojnice 1 – PG2, PG5; přípojnice 2 – TG, PG6) nebude možno provozovat kvůli velkému nárazovému zkratovému proudu. Proto jsem navrhl náhradní podobné zapojení (přípojnice 1 – PG1, PG2, PG5; přípojnice 2 – TG, PG3), které by pokrylo dokonce vyšší výkon, ale u toho také přesáhl nárazový zkratový proud výdržnost rozvodny. Nakonec jsem navrhl další náhradní zapojení (přípojnice 1 – PG1, PG2, PG5; přípojnice 2 – TG), které by vyhovovalo výdržnosti rozvodny, ale pokrylo by o něco menší výkon.

Literatura

- [1] C-Energy, 2022. *Profil C-Energy* [online]. [cit. 16.11.2022]. Dostupné z: <https://www.c-energy.cz/o-nas/profil-c-energy>
- [2] C-Energy, 2022. *Technologie* [online]. [cit. 16.11.2022]. Dostupné z: <https://www.c-energy.cz/o-nas/technologie>
- [3] OTE, 2018. *Mapy ke stažení* [online]. [cit. 18.11.2022]. Dostupné z: <https://www.ote-cr.cz/cs/statistika/mapy-ke-stazeni>
- [4] ŠMÍD, Jakub, 2019. *Projekty společného zájmu v oblasti elektrické energie - 1. část* [online]. 12. 10. [cit. 18.11.2022]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektroenergetika/projekty-spolecneho-zajmu-v-oblasti-elektricke-energie-1-cast>
- [5] OTE, 2018. *Elektrické sítě* [online]. [cit. 20.11.2022]. Dostupné z: <https://www.sand.ote-cr.cz/cs/statistika/dlouhodobav-rovnovaha-elektrina/elektricke-site>
- [6] ŠMÍD, Jakub, 2019. *Projekty společného zájmu v oblasti elektrické energie - 1. část* [online]. 14. 10. [cit. 18.11.2022]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektroenergetika/projekty-spolecneho-zajmu-v-oblasti-elektricke-energie-2-cast>
- [7] PSP-UFU, 2022. *About PSP-UFU* [online]. [cit. 25.11.2022]. Dostupné z: <https://thales1330.github.io/PSP/docs/>
- [8] Pandapower, 2022. *About pandapower* [online]. [cit. 25.11.2022]. Dostupné z: <http://www.pandapower.org/about/>
- [9] Pandapower, 2022. *Three Winding Transformer* [online]. [cit. 5.4.2023]. Dostupné z: <https://pandapower.readthedocs.io/en/latest/elements/trafo3w.html#three-winding-transformer>
- [10] ČSN 33 3020, Elektrotechnické předpisy, Praha, 1992. *Výpočet poměru při zkratech v trojfázové elektrizační soustavě.*
- [11] ČSN EN 60909-0, Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách, Praha, 2016. *Část 0: Výpočet proudů.*
- [12] PSP-UFU, 2022. *PSP-UFU* [software]. [cit. 18.4.2023]. Dostupné z: <http://www.thales1330.github.io/PSP/>.
- [13] L. Thurner, A. Scheidler, F. Schäfer et al, 2018. *Pandapower - an Open Source Python Tool for Convenient Modeling, Analysis and Optimization of Electric Power Systems, in IEEE Transactions on Power Systems* [software], vol. 33, no. 6, pp. 6510-6521. [cit. 18.4.2023]. Dostupné z: <http://www.pandapower.org/>
- [14] JET BRAINS, 2023. *PyCharm-The Python IDE for Professional Developers* [software]. [cit. 18.4.2023]. Dostupné z: <https://www.jetbrains.com/pycharm/>

[15] PROFICAD, 2023. *ProfiCAD*. [software]. [cit. 18.4.2023]. Dostupné z:

<https://www.proficad.cz/stahnout.aspx>

[16] TESAŘOVÁ, Miloslava. *Přednáška-Zkratové poměry*. [online]. [cit. 28.4.2023]. ZČU v Plzni.

Seznam obrázků

Obr. 1 Mapa současného vedení 110 kV a 220 kV v okolí Tábora.....	- 5 -
Obr. 2 Mapa vedeních 220 kV, které budou nahrazeny vedeními 400 kV	- 6 -
Obr. 3 Trasa dvojitého vedení 400 kV z rozvodny Kočín do rozvodny Mírovka.....	- 7 -
Obr. 4 Schéma rozvodny 10,5 kV	- 10 -
Obr. 5 Náhradní schéma rozvody 10,5 kV	- 11 -
Obr. 6 Simulace výpočtu zkratu na přípojnici 1 pomocí softwaru PSP-UFU (odpojený solární zdroj).....	- 12 -
Obr. 7 Simulace výpočtu zkratu na přípojnici 1 pomocí softwaru PSP-UFU (připojený solární zdroj).....	- 13 -
Obr. 8 Hodnoty zkratových proudů zasláné od p. Miroslava Kozáka.....	- 14 -
Obr. 9 Technické parametry trojvinutového transformátoru	- 15 -
Obr. 10 Štítek generátoru	- 17 -
Obr. 11 Technické specifikace plynového motor-generátoru (PG 1-4)	- 18 -
Obr. 12 Technické specifikace plynového motor-generátoru (PG 1-4)	- 20 -
Obr. 13 Technické specifikace reaktoru	- 21 -
Obr. 14 Výchozí náhradní schéma pro výpočet zkratu metodou ekvivalentního zdroje napětí v místě zkratu	- 24 -
Obr. 15 První úprava schématu	- 30 -
Obr. 16 Druhá úprava schématu	- 32 -
Obr. 17 Třetí úprava schématu Obr. 18 Finální úprava schématu	- 33 -
Obr. 19 Logika spínačů v programu Pandapower	- 36 -
Obr. 20 Výpis výsledků z programu Pandapower	- 37 -
Obr. 21 Schéma zapojení tří dvojvinutových transformátorů.....	- 38 -
Obr. 22 Vytvořená elektrická síť v programu PSP-UFU	- 42 -
Obr. 23 Ukázka zapojení spínačů.....	- 43 -
Obr. 24 Parametry rozvodny	- 45 -
Obr. 25 Zapojení 1 - současné zapojení generátoru s provozem TG	- 46 -
Obr. 26 Zapojení 2 - současné zapojení generátoru bez provozu TG	- 47 -
Obr. 27 Nastavení ochran rozvodny 10,5 kV	- 49 -
Obr. 28 Technické specifikace vypínačů v rozvodně 10,5 kV	- 49 -
Obr. 29 Určení součinitele n pro tepelný účinek střídavé složky zkratového proudu.....	- 50 -
Obr. 30 Určení součinitele λ_{max} pro stroje s hladkým rotorem	- 51 -
Obr. 31 Zapojení 3 – Jedno z možných zapojení generátoru	- 56 -

Obr. 32 Zapojení 4 – Jedno z možných zapojení generátoru	- 57 -
--	--------

Seznam tabulek

Tabulka 1 Souhrn zdrojů elektrické energie.....	- 2 -
Tabulka 2 Přehled dalších programů pro výpočet zkratových poměrů	- 9 -
Tabulka 3 Parametry vodičů.....	- 23 -
Tabulka 4 Dopočtené hodnoty korekčních koeficientů a zkratových impedancí pro všechny generátory v síti	- 28 -
Tabulka 5 Dopočtené hodnoty zkratových impedancí pro všechny vodiče v síti přepočtené na napěťovou hladinu 10,5 kV	- 30 -
Tabulka 6 Parametry k náhradě trojvinutového transformátoru	- 39 -
Tabulka 7 Přehled dopočtených hodnot pro náhradu trojvinutového transformátoru ...	- 41 -
Tabulka 8 Srovnání výsledků zkratových proudů pro srovnávací zapojení	- 43 -
Tabulka 9 Výsledné zkratové proudy pro zapojení 1	- 55 -
Tabulka 10 Výsledné souměrného vypínacího proudy pro vypínače generátorů a přípojníc v rozvodně 10,5 kV pro zapojení 1.....	- 55 -
Tabulka 11 Výsledné zkratové proudy pro zapojení 2	- 55 -
Tabulka 12 Výsledné souměrného vypínacího proudy pro vypínače generátorů a přípojníc v rozvodně 10,5 kV pro zapojení 2.....	- 55 -
Tabulka 13 Výsledné zkratové proudy pro zapojení 3	- 56 -
Tabulka 14 Výsledné souměrného vypínacího proudy pro vypínače generátorů a přípojníc v rozvodně 10,5 kV pro zapojení 3.....	- 56 -
Tabulka 15 Výsledné zkratové proudy pro zapojení 4	- 57 -
Tabulka 16 Výsledné souměrného vypínacího proudy pro vypínače generátorů a přípojníc v rozvodně 10,5 kV pro zapojení 4.....	- 57 -

Přílohy

Příloha 1- Kód pro vytvoření elektrické sítě a výpočet zkratových proudů v programu Pandapower [14]

```
import pandapower as pp
import pandapower.shortcircuit as sc

net = pp.create_empty_network()

# vytvoreni pripojnic

bus1 = pp.create_bus(net, vn_kv=10.5, name="Bus 1")
bus2 = pp.create_bus(net, vn_kv=10.5, name="Bus 2")
bus3 = pp.create_bus(net, vn_kv=110., name="Bus 3")
bus4 = pp.create_bus(net, vn_kv=6, name="Bus 4")
bus5 = pp.create_bus(net, vn_kv=6, name="Bus 5")

bustrafold = pp.create_bus(net, vn_kv=10.5, name="Bustrafo
1d")
bustrafold2d = pp.create_bus(net, vn_kv=10.5, name="Bustrafo
2d")
bustrafold1h = pp.create_bus(net, vn_kv=110., name="Bustrafo
1h")
bustrafold2h = pp.create_bus(net, vn_kv=110., name="Bustrafo
2h")

busTG = pp.create_bus(net, vn_kv=10.5, name="Bus TG")
busPG1 = pp.create_bus(net, vn_kv=10.5, name="Bus PG1")
busPG2 = pp.create_bus(net, vn_kv=10.5, name="Bus PG2")
busPG3 = pp.create_bus(net, vn_kv=10.5, name="Bus PG3")
busPG4 = pp.create_bus(net, vn_kv=10.5, name="Bus PG4")
busPG5 = pp.create_bus(net, vn_kv=10.5, name="Bus PG5")
busPG6 = pp.create_bus(net, vn_kv=10.5, name="Bus PG6")

busswitchTG = pp.create_bus(net, vn_kv=10.5, name="Bus
switchTG")
busswitchPG1 = pp.create_bus(net, vn_kv=10.5, name="Bus
switchTG1")
busswitchPG2 = pp.create_bus(net, vn_kv=10.5, name="Bus
switchTG2")
busswitchPG3 = pp.create_bus(net, vn_kv=10.5, name="Bus
switchTG3")
busswitchPG4 = pp.create_bus(net, vn_kv=10.5, name="Bus
switchTG4")
busswitchPG5 = pp.create_bus(net, vn_kv=10.5, name="Bus
switchTG5")
busswitchPG6 = pp.create_bus(net, vn_kv=10.5, name="Bus
```

```
switchTG6")

busR = pp.create_bus(net, vn_kv=10.5, name="Bus Reaktor")

# vytvoreni externi site
#vyhledovy stav
pp.create_ext_grid(net, bus=bus3, name="Externi sit",
s_sc_max_mva=1181.25865)

#soucasny stav
#pp.create_ext_grid(net, bus=bus3,name="Externi
sit",s_sc_max_mva= 876.4177)

net.ext_grid['rx_max'] = 0.1

# vytvoreni traf
trafo1 = pp.create_transformer3w_from_parameters(net,
hv_bus=bustrafolh, mv_bus=bustrafold, lv_bus=bus4,
vn_hv_kv=121., vn_mv_kv=10.5, vn_lv_kv=6.3, sn_hv_mva=65,
sn_mv_mva=65, sn_lv_mva=25, vk_hv_percent=12.5,
vk_mv_percent=5.5, vk_lv_percent=11., vkr_hv_percent=0.488,
vkr_mv_percent=0.392, vkr_lv_percent=0.436, i0_percent=0.2,
pfe_kw=32, shift_mv_degree=0, shift_lv_degree=0,
tap_side="hv", tap_neutral=0, tap_min=-8, tap_max=8,
tap_step_percent=2., tap_pos=0, name='HV-MV-MV-Trafo1')

trafo2 = pp.create_transformer3w_from_parameters(net,
hv_bus=bustrafo2h, mv_bus=bustrafo2d, lv_bus=bus5,
vn_hv_kv=121., vn_mv_kv=10.5, vn_lv_kv=6.3, sn_hv_mva=65,
sn_mv_mva=65, sn_lv_mva=25, vk_hv_percent=12.5,
vk_mv_percent=5.5, vk_lv_percent=11., vkr_hv_percent=0.488,
vkr_mv_percent=0.392, vkr_lv_percent=0.436, i0_percent=0.2,
pfe_kw=32, shift_mv_degree=0, shift_lv_degree=0,
tap_side="hv", tap_neutral=0, tap_min=-8, tap_max=8,
tap_step_percent=2., tap_pos=0, name='HV-MV-MV-Trafo2')

# vytvoreni vodicu

#line1, line2
data_line1a2 = {"c_nf_per_km": 177, "r_ohm_per_km": 0.0749,
"x_ohm_per_km": 0.243, "max_i_ka": 10, "type": "cs", "q_mm2":
400}
pp.create_std_type(net, data_line1a2, name="XDRCU-ALT 1x400AL
110/64 kV", element='line')
line1 = pp.create_line(net, from_bus=bus3, to_bus=bustrafolh,
length_km=0.8, std_type="XDRCU-ALT 1x400AL 110/64 kV")
line2 = pp.create_line(net, from_bus=bus3, to_bus=bustrafo2h,
length_km=0.8, std_type="XDRCU-ALT 1x400AL 110/64 kV")

#line3, line4
```

```
data_line3a4 = {"c_nf_per_km": 680, "r_ohm_per_km": 0.0469/6,
"x_ohm_per_km": 0.1508/6, "max_i_ka": 10, "type": "cs",
"q_mm2": 630}
pp.create_std_type(net, data_line3a4, name="10-AXEKVCEY
630/35", element='line')
line3 = pp.create_line(net, from_bus=bustrafold, to_bus=bus1,
length_km=0.112, std_type="10-AXEKVCEY 630/35")
line4 = pp.create_line(net, from_bus=bustrafold, to_bus=bus2,
length_km=0.091, std_type="10-AXEKVCEY 630/35")

#lineTG
data_lineTG = {"c_nf_per_km": 0, "r_ohm_per_km": 0.0469/2,
"x_ohm_per_km": 0.1508/2, "max_i_ka": 0.635, "type": "cs",
"q_mm2": 630}
pp.create_std_type(net, data_lineTG, name="lineTG",
element='line')
lineTG = pp.create_line(net, from_bus=busswitchTG,
to_bus=busR, length_km=0.112, std_type="lineTG")

#linePG1-4
data_linePG1_4 = {"c_nf_per_km": 0, "r_ohm_per_km": 0.124/2,
"x_ohm_per_km": 0.285/2, "max_i_ka": 0., "type": "cs",
"q_mm2": 630}
pp.create_std_type(net, data_linePG1_4, name="linePG1_4",
element='line')
linePG1 = pp.create_line(net, from_bus=busswitchPG1,
to_bus=busPG1, length_km=0.062, std_type="linePG1_4")
linePG2 = pp.create_line(net, from_bus=busswitchPG2,
to_bus=busPG2, length_km=0.054, std_type="linePG1_4")
linePG3 = pp.create_line(net, from_bus=busswitchPG3,
to_bus=busPG3, length_km=0.046, std_type="linePG1_4")
linePG4 = pp.create_line(net, from_bus=busswitchPG4,
to_bus=busPG4, length_km=0.038, std_type="linePG1_4")

#linePG5-6
data_linePG5a6 = {"c_nf_per_km": 0, "r_ohm_per_km": 0.099/2,
"x_ohm_per_km": 0.154/2, "max_i_ka": 0., "type": "cs",
"q_mm2": 630}
pp.create_std_type(net, data_linePG5a6, name="linePG5a6",
element='line')
linePG5 = pp.create_line(net, from_bus=busswitchPG5,
to_bus=busPG5, length_km=0.05, std_type="linePG5a6")
linePG6 = pp.create_line(net, from_bus=busswitchPG6,
to_bus=busPG6, length_km=0.06, std_type="linePG5a6")

# vytvoreni spinacu

#pricny spinac pripojnic
sw1 = pp.create_switch(net, bus=bus1, element=bus2, et="b",
type="DS", closed=False)
```



```
# spinace pro TG
sw2 = pp.create_switch(net, bus=bus2, element=busswitchTG,
et="b", type="DS", closed=False)
sw3 = pp.create_switch(net, bus=bus1, element=busswitchTG,
et="b", type="DS", closed=True)

# spinace pro PG1
sw4 = pp.create_switch(net, bus=bus2, element=busswitchPG1,
et="b", type="DS", closed=False)
sw5 = pp.create_switch(net, bus=bus1, element=busswitchPG1,
et="b", type="DS", closed=True)

# spinace pro PG2
sw6 = pp.create_switch(net, bus=bus2, element=busswitchPG2,
et="b", type="DS", closed=False)
sw7 = pp.create_switch(net, bus=bus1, element=busswitchPG2,
et="b", type="DS", closed=True)

# spinace pro PG3
sw8 = pp.create_switch(net, bus=bus2, element=busswitchPG3,
et="b", type="DS", closed=False)
sw9 = pp.create_switch(net, bus=bus1, element=busswitchPG3,
et="b", type="DS", closed=True)

# spinace pro PG4
sw10 = pp.create_switch(net, bus=bus2, element=busswitchPG4,
et="b", type="DS", closed=True)
sw11 = pp.create_switch(net, bus=bus1, element=busswitchPG4,
et="b", type="DS", closed=False)

# spinace pro PG5
sw12 = pp.create_switch(net, bus=bus2, element=busswitchPG5,
et="b", type="DS", closed=True)
sw13 = pp.create_switch(net, bus=bus1, element=busswitchPG5,
et="b", type="DS", closed=False)

# spinace pro PG6
sw14 = pp.create_switch(net, bus=bus2, element=busswitchPG6,
et="b", type="DS", closed=True)
sw15 = pp.create_switch(net, bus=bus1, element=busswitchPG6,
et="b", type="DS", closed=False)

# vytvoreni generatoru

# TG
pp.create_gen(net, bus=busTG, p_mw=26., sn_mva=28.,
vn_kv=10.5, xdss_pu=0.0569, rdss_ohm=0.0157, cos_phi=0.93,
pg_percent=0, name="generatorTG")

#PG1-4
pp.create_gen(net, bus=busPG1, p_mw=9.89, sn_mva=11.702,
```

```
vn_kv=10.5, xdss_pu=0.228, rdss_ohm=0.055, cos_phi=0.8,
name="generatorPG1")
pp.create_gen(net, bus=busPG2, p_mw=9.89, sn_mva=11.702,
vn_kv=10.5, xdss_pu=0.228, rdss_ohm=0.055, cos_phi=0.8,
name="generatorPG2")
pp.create_gen(net, bus=busPG3, p_mw=9.89, sn_mva=11.702,
vn_kv=10.5, xdss_pu=0.228, rdss_ohm=0.055, cos_phi=0.8,
name="generatorPG3")
pp.create_gen(net, bus=busPG4, p_mw=9.89, sn_mva=11.702,
vn_kv=10.5, xdss_pu=0.228, rdss_ohm=0.055, cos_phi=0.8,
name="generatorPG4")

#PG5-6
pp.create_gen(net, bus=busPG5, p_mw=11.972, sn_mva=14.340,
vn_kv=10.5, xdss_pu=0.15, rdss_ohm=0.0284, cos_phi=0.8,
name="generatorPG5")
pp.create_gen(net, bus=busPG6, p_mw=11.972, sn_mva=14.340,
vn_kv=10.5, xdss_pu=0.15, rdss_ohm=0.0284, cos_phi=0.8,
name="generatorPG6")

# vytvoreni reaktoru
pp.create_impedance(net, from_bus=busR, to_bus=busTG,
rft_pu=0.000435, xft_pu=0.0828, sn_mva=29.0984535671571)

# vypocet razoveho a narazoveho zkratoveho proudu
sc.calc_sc(net, fault="3ph", case="max", ip=True)

# vypsani vysledku
print(net.res_bus_sc)
```

Príloha 2- Zväčšené schéma rozvodny 10,5 kV

