

Fakulta elektrotechnická
Katedra elektroenergetiky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Připojování menších obnovitelných zdrojů energie do distribuční
sítě

Autor práce: **Bc. Miloš Dědek**
Vedoucí práce: **doc. Ing. Lucie Noháčová Ph.D.**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2022/2023

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Miloš DĚDEK**
Osobní číslo: **E21N0004P**
Studijní program: **N0713A060013 Výkonové systémy a elektroenergetika**
Specializace: **Elektroenergetika**
Téma práce: **Připojování menších obnovitelných zdrojů energie do distribuční sítě**
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky**

Zásady pro vypracování

1. Provedte rozbor zákona o řízení P, Q u zdrojů nad 100 kW a uveďte možnosti připojování obnovitelných zdrojů menších výkonů v České republice.
2. Vysvětlete princip regulace napětí a jalového výkonu v distribuční síti a jeho vlivu na změnu napětí v předávacím místě. Uveďte základní informace ohledně nabíjecího kapacitního proudu kabelové sítě.
3. Na konkrétní případové studii proveďte návrh připojení vybraného obnovitelného zdroje do distribuční sítě včetně návrhu kompenzačního a dekompenzačního výkonu při tomto připojení.
4. Zhodnoťte získané informace a výsledky z pohledu technických a ekonomických aspektů včetně přínosů, popř. vlivů připojení těchto zdrojů na distribuční síť.

Rozsah diplomové práce: **40 – 60**
Rozsah grafických prací: **min. 5**
Forma zpracování diplomové práce: **elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. Skripta a přednášky z předmětu Elektroenergetika I, II.
2. Internetové podklady. Legislativní předpisy o řízení P, Q u zdrojů nad 100 kW.
3. Student si další vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího a konzultanta práce, včetně internetových podkladů.

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Lucie Noháčová, Ph.D.**
Katedra elektroenergetiky

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



Zdeněk Peroutka

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

Karel Noháč

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

V Plzni dne 7. října 2022

Abstrakt

Tato diplomová práce řeší problematiku obnovitelných zdrojů připojených do distribuční sítě. Cílem práce bylo tyto problémy popsat a navrhnout jejich řešení. Tato řešení poté použít na konkrétním případě a vytvořit návrh připojení fotovoltaické elektrárny do distribuční sítě tak, aby byly splněny všechny podmínky provozovatele distribuční sítě. Ze získaných výsledků byl následně vytvořen závěr zhodnocující dopady, které elektrárna distribuční síti způsobí. Také je v práci vyhodnocena ekonomická návratnost celé investice.

Klíčová slova

Obnovitelné zdroje energie, distribuční síť, fotovoltaická elektrárna, integrace, problémy, řešení, dopad, ekonomická návratnost, investice.

Abstract

This diploma thesis focuses on the problems caused by the integration of renewable energy resources into distribution networks. The main objective of this thesis is to describe these problems and propose possible solutions. To accomplish this, specific solutions will be applied to a case study involving the connection of a photovoltaic power plant to the distribution network, while ensuring compliance with distributor requirements. A conclusion will be drawn based on the results, evaluating the impact of the plant on the distribution network, and assessing the economic return on the investment.

Key Words

Renewable energy, distribution network, photovoltaic power plant, integration, problems, solutions, impact, economic return, investment.

Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 26.5.2023

Bc. Miloš Dědek

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucí této diplomové práce, paní Ing. Lucii Noháčové, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Také velice děkuji konzultantovi, se kterým jsem spolupracoval, panu Ing. Františkovi Žákovi, Ph.D. za jeho připomínky a důležité poznatky z praxe.

Obsah

Úvod	- 1 -
1 Elektrizace soustava České republiky	- 3 -
1.1 Přenosová soustava	- 4 -
1.2 Distribuční soustava.....	- 5 -
1.3 Topologie distribučních sítí	- 7 -
1.3.1 Paprsková síť	- 7 -
1.3.2 Okružní síť.....	- 8 -
1.3.3 Mřížová síť	- 8 -
2 Obnovitelné zdroje v České republice.....	- 10 -
2.1 Vodní elektrárny	- 10 -
2.2 Fotovoltaické elektrárny	- 11 -
2.3 Větrné elektrárny	- 12 -
2.4 Elektrárny spalující biomasu.....	- 13 -
2.5 Bioplynové stanice.....	- 14 -
3 Připojování obnovitelných zdrojů do distribuční sítě.....	- 15 -
3.1 Zákon 458/2000 Sb. § 23	- 15 -
3.2 Pravidla pro provozování distribuční soustavy příloha 4	- 17 -
3.2.1 Přihlašovací řízení	- 18 -
3.2.2 Připojení k síti.....	- 18 -
3.2.3 Provoz výroben v distribuční síti.....	- 19 -
3.2.4 Zásady podpory sítě.....	- 20 -
3.2.5 Řízení činného výkonu	- 23 -
3.2.6 Řízení jalového výkonu	- 24 -
3.2.7 Možnosti připojení obnovitelných zdrojů do distribuční sítě.....	- 25 -
4 Principy regulace napětí a jalového výkonu v distribuční síti.....	- 27 -
4.1 Regulace napětí.....	- 27 -
4.2 Regulace jalového výkonu.....	- 28 -
4.3 Nabíjecí kapacitní proud kabelové sítě	- 29 -
5 Návrh připojení zdroje do sítě	- 30 -

5.1	Výběr prvků sítě a jejich parametry	- 31 -
5.2	Dopočet parametrů vedení	- 32 -
5.3	Výpočet parametrů transformátorů	- 35 -
5.4	Výpočet výkonů a proudů na vedení	- 37 -
5.5	Výpočet úbytků napětí	- 39 -
5.6	Výpočet napěťových poměrů.....	- 40 -
5.7	Výpočet výkonových ztrát na vedení.....	- 40 -
5.8	Výpočet jalového výkonu elektrárny	- 41 -
5.9	Vliv zdroje na distribuční síť	- 41 -
5.10	Návrh dekompenzačního výkonu.....	- 44 -
5.11	Vytvoření uživatelské aplikace	- 45 -
6	Zhodnocení výsledků a ekonomických aspektů	- 47 -
6.1	Zhodnocení ekonomických aspektů.....	- 48 -
	Závěr.....	- 53 -
	Literatura	- 55 -
	Přílohy	I

Seznam symbolů a zkratk

ČR	Česká republika
ENTSO-E	European Network of Transmission System Operators for Electricity
ERÚ	Energetický regulační úřad
FRT	Fault-ride-through
G	Generátor
HDO	Hromadné dálkové ovládání
MN	Malé napětí
MTN	Měřicí transformátor napětí
MTP	Měřicí transformátor proudu
NN	Nízké napětí
PDS	Provozovatel distribuční soustavy
PS	Přenosová soustava
PV	Photovoltaics
VN	Vysoké napětí
ZVN	Zvláště vysoké napětí

Úvod

Množství elektrické energie dodávané do sítě obnovitelnými zdroji neustále roste. Na celém světě se zvyšuje počet fotovoltaických a větrných elektráren z důvodu snížení dopadů na životní prostředí naší neustále se vyvíjející civilizace. Současná tendence v elektrizační soustavě směřuje k soběstačnosti v zásobování elektrickou energií, a to také tím, že se tuto zodpovědnost snaží přenést přímo na spotřebitele, který je pomocí dotací motivován k tomu, aby si zhotovil svoji vlastní elektrárnu v místě jeho spotřeby. Toto řešení v sobě ale skrývá nespočet problémů, se kterými se musí provozovatelé distribuční soustavy vypořádat. Tento trend mě motivoval k tomu, abych se problémem více zabýval. V této diplomové práci nastíním možné problémy, které kvůli obnovitelným zdrojům mohou vzniknout a budu se zabývat jejich řešením.

V první části práce popíši, jakým způsobem je elektrizační síť v České republice provozována. Také zde uvedu, kteří provozovatelé sítě zajišťují a jak velká je jejich část elektrizační sítě. Na tuto kapitolu navážím pojednáním o obnovitelných zdrojích, které se v České republice nachází. Zhodnotím, jaký počet těchto zdrojů zde máme a jakou částí se podílí na celkové výrobě Česka. Následně uvedu, jak se jednotlivé zdroje na síti chovají a jak ji ovlivňují.

V další kapitole popisují zákony a pravidla provozování distribuční soustavy, které se týkají provozu výroben připojených do soustavy s výkonem nad 100 kW. Zde shrnuji, jak se musí výrobce elektrické energie na síti chovat podle nejnovějších pravidel. Také uvádím možnost připojení obnovitelného zdroje do této části sítě.

V následující části práce pojednávám o způsobech regulace napětí a jalového výkonu v elektrizační síti. Zde vysvětluji, jaký má jalový výkon vliv na napětí v síti a následně také vliv připojení kabelů a jejich nabíjecích výkonů na síť. Touto kapitolou ukončuji teoretickou část mé práce.

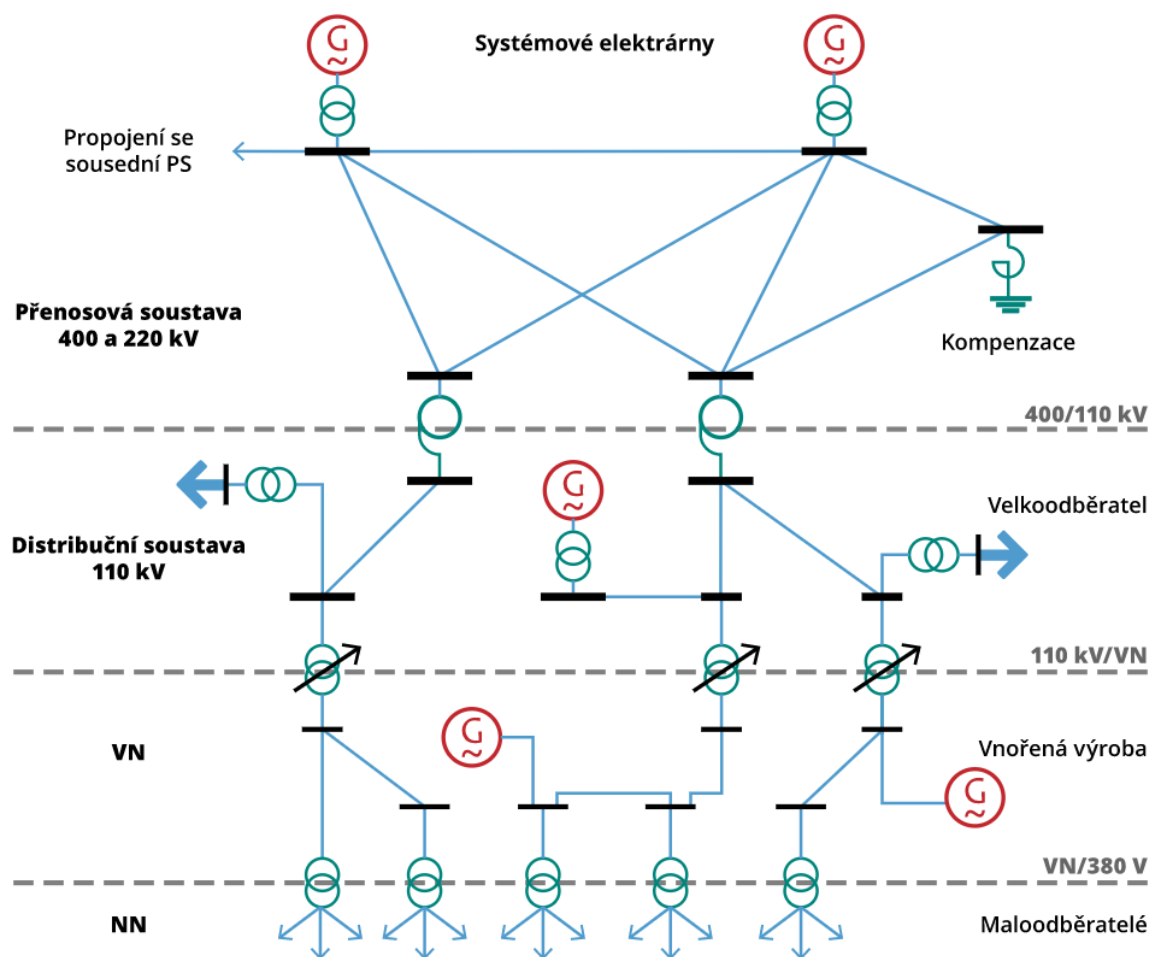
V druhé sekci práce se již zabývám praktickým připojením zdroje nacházejícím se v síti, kterou navrhl můj pan konzultant tak, aby na ní bylo nejlépe vidět, jaký má elektrárna vliv na její chování. Jedná se o připojení fotovoltaické elektrárny o instalovaném výkonu 1,5 MW

do kabelové distribuční sítě. Zde počítám s jednotlivými toky výkonů a vynáším do grafu, jak se s elektrárnou mění napětí v bodech sítě a také ztráty v síti. Poté navrhuji dekompenzační tlumivku pro kabely, kterými fotovoltaická elektrárna síť zatěžuje.

V poslední části vytvořím ekonomickou analýzu elektrárny, odhadnu její celkovou cenu a pomocí softwaru pro sluneční osvit spočítám, jakou může mít elektrárna roční výrobu. Z těchto hodnot zjistím, jakou má investice do fotovoltaické elektrárny návratnost a zda se vyplatí ji postavit.

1 Elektrizační soustava České republiky

Elektrizační soustava je množina zařízení, která jsou využívána pro výrobu, dálkový přenos, transformaci a následnou distribuci elektrické energie. Je to způsob propojení malého počtu míst, kde se elektrická energie vytváří, s velkým množstvím možných odběratelů. Součástí soustavy je obrovská délka kabelových a lanových vedení a velký počet prvků, které přenos usnadňují, jako jsou například transformátory. Dále nesmíme opomenout nesčetné množství ochran, které se starají o bezpečnost a spolehlivost dodávky. Velice důležitou částí elektrizační soustavy jsou informační a řídicí prvky. Elektrizační soustavu rozdělujeme podle charakteru jednotlivých částí. Dělí se na přenosovou a distribuční soustavu.



Obr. 1-1 Hierarchie elektrizační soustavy České republiky [1]

V České republice se napětí rozděluje do jednotlivých hladin, které jsou popsány v tabulce. (viz Tabulka 1.1)

Tabulka 1.1- Rozdělení hladin napětí ČR

	Napětí
Malé napětí (mn)	0-50 V
Nízké napětí (nn)	50-1000 V
Vysoké napětí (vn)	52-300 kV
Zvláště vysoké napětí (zvn)	300-800 kV

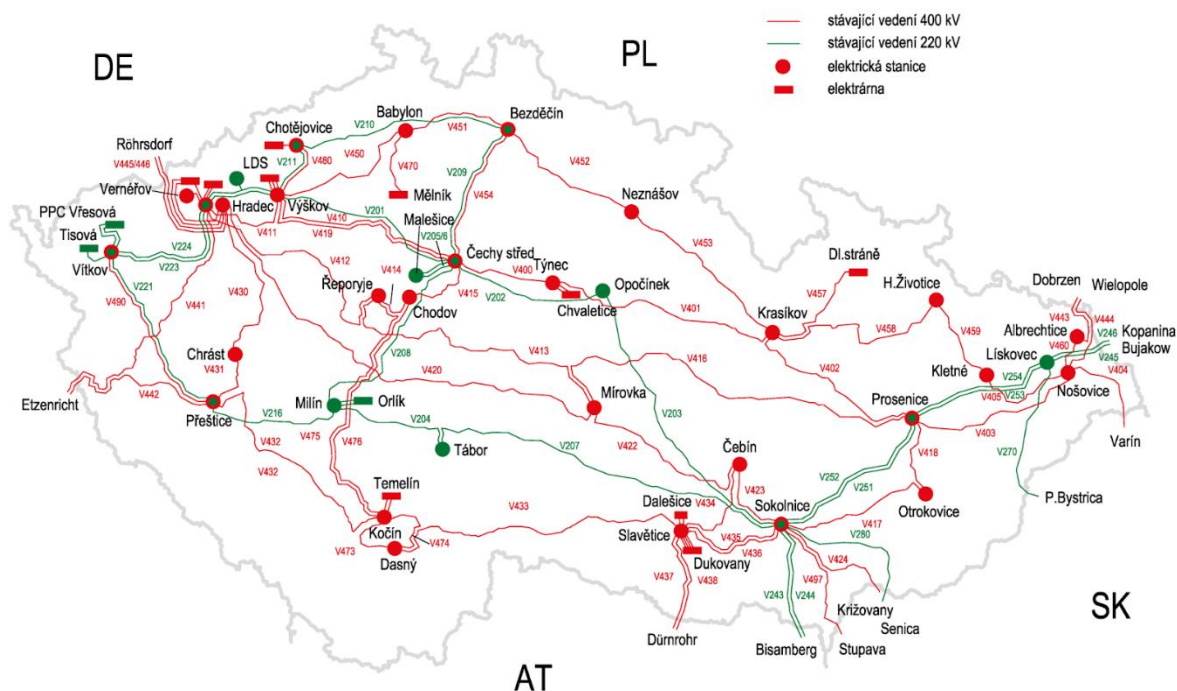
1.1 Přenosová soustava

Tato část soustavy zajišťuje přepravu velkých výkonů elektrické energie na velké vzdálenosti. V přenosové soustavě jsou pomocí nadzemních vedení pospojovány velké elektrárny a také místa s velkými odběry, především stanice distribuční sítě. Celá síť je vzájemně propojena pomocí uzlů, aby v případě poruchy nebo údržby nebylo nutné odpojit odběratele. Pokud tato situace nastane, provede se překonfigurování sítě a výkon se k odběrateli přivede jinou cestou. Toto pravidlo, které se v elektrizační soustavě dodržuje se nazývá N-1. Znamená to, že pokud dojde k výpadku jednoho zdroje, je možné jej nahradit jiným zdrojem, aby nedocházelo k častým výpadkům.

Generátory v elektrárnách většinou generují elektrickou energii na napěťové hladině 10 až 15 kV, pokud bychom chtěli na této hladině výkon přenášet na větší vzdálenosti, docházelo by k vysokým ztrátám v přenosu, protože by vedením protékaly velké proudy. Z toho důvodu se v blízkosti elektráren umísťují transformační stanice, které zvyšují napětí na jinou napěťovou hladinu. V České republice se pro přenos používá hladina 220 a 400 kV. [1]

Další využití přenosové soustavy je propojení sítě s okolními státy. V Evropě se tato propojená síť provozovatelů soustav nazývá ENTSO-E, což je anglická zkratka pro European Network of Transmission System Operators for Electricity. Tato asociace se skládá z 43 evropských provozovatelů přenosových soustav, takto je propojeno 36 zemí Evropy. Díky tomuto uskupení je jednodušší vzájemné obchodování s elektrickou energií mezi členskými státy a také je tím zvýšena spolehlivost dodávky elektřiny a snížena pravděpodobnost blackoutů. [2]

V České republice přenosovou síť provozuje výhradně společnost ČEPS, a.s. Stará se také o služby, které zajišťují, aby byla spotřeba a výroba elektrické energie v rovnováze. Vlastní 3795 km tras na napěťové úrovni 400 kV, rovněž vedení o délce 1824 km s napěťovou hladinou 220 kV a 84 km vedení na hladině 110 kV. Také zajišťuje údržbu, rozvoj a obnovu této soustavy, na které se nachází 44 rozvodnů se 78 transformátory. Některé tyto rozvodny slouží také pro propojení přenosové a distribuční soustavy. Dále zajišťuje přenosová propojení s okolními státy pro import, export a tranzit elektrického výkonu.



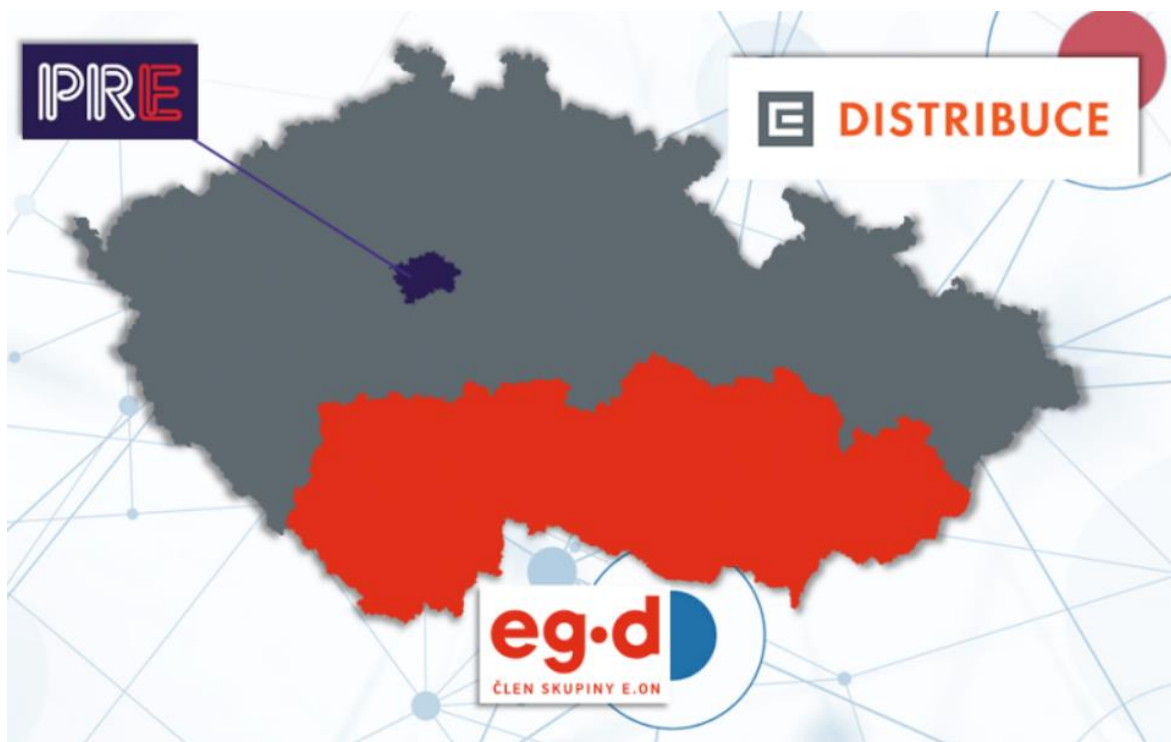
Obr. 1-2 Schéma přenosové sítě České republiky [3]

1.2 Distribuční soustava

Primární účel distribuční soustavy je propojení přenosové sítě s koncovými zákazníky, kteří odebírají elektrický výkon. Do této části sítě je také možné připojovat zdroje s menšími výkony, řádově desítky MW. Opět se jako u přenosové soustavy využívá různých napěťových hladin, aby se omezily ztráty při přenosu na minimum. Také se v transformovnách volí takový převod, aby zákazníci dostávali elektrický výkon v předem nasmlouvané kvalitě, kterou určuje norma ČSN EN 50160. Pro distribuci by bylo z hlediska ztrát nejvýhodnější opět použít napěťové hladiny jako u přenosových vedení, ale to by bylo velice nákladné na výstavbu. Z toho důvodu se používají nižší napěťové hladiny. Vzniklé ztráty jsou ovlivněné velikostí protékajícího proudu, proto pro přenos nižších výkonů nejsou tak znatelné a distribuční síť se navrhuje takovým způsobem, že se napěťová

hladina postupně snižuje a koncové větve sítě se poté provozují na nejnižším napětí. Tato koncová vedení mají také nejmenší délku. [4]

V České Republice jsou nejvýznamnější provozovatelé distribučních sítí EG.D Distribuce, a. s., ČEZ distribuce a. s., a PRE distribuce a. s. Na obrázku (Obr. 1-3) je vidět, které území distribuční sítě ČR jednotlivé společnosti spravují.



Obr. 1-3 Rozdělení společností distribuční sítě v České republice [5]

Délky vedení, které mají společnosti vlastní a zodpovídají za jejich funkčnost jsem uvedl v tabulce 1-2.

Tabulka 1.2- Délky vedení distribučních společností ČR [6]

Distribuční společnost	DÉLKA VEDENÍ VVN	DÉLKA VEDENÍ VN	DÉLKA VEDENÍ NN
ČEZ Distribuce, a. s.	9 845 km	50 698 km	103 721 km
EG.D, a. s.	3 176,1 km	21 754 km	38 837 km
PREdistribuce, a. s.	202,2 km	3 829 km	7 750 km

Pro vedení elektrického výkonu v distribučních sítích se využívají jak nadzemní lana, tak kabelová vedení, která jsou uložena v zemi. Kabelová vedení jsou sice spolehlivější a nepodléhají atmosférickým a povětrnostním vlivům tak, jako venkovní nadzemní vedení, ale

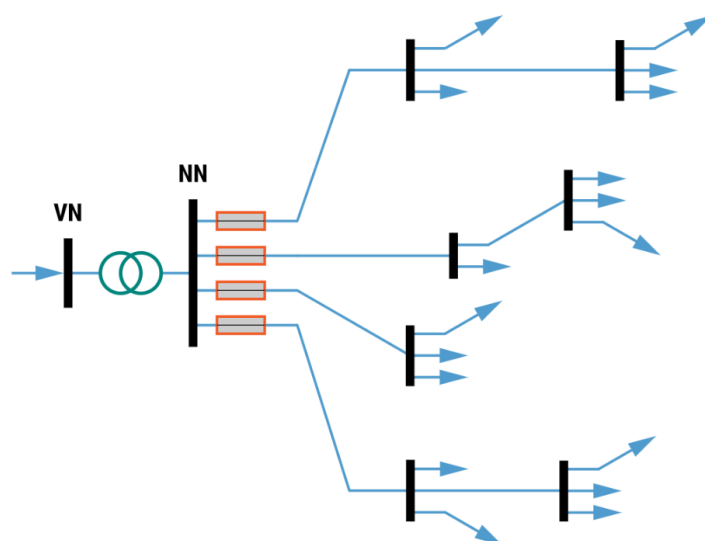
jsou dražší na výstavbu. Kabelová vedení se používají převážně v místech, kde je náročné postavit vedení stožárová a také ve městech či na vesnicích.

1.3 Topologie distribučních sítí

Distribuční sítě je možné dále rozlišovat podle způsobu zapojení jednotlivých odběrů. Každý způsob zapojení má svá pozitiva, ale i úskalí. Nejdůležitějšími porovnávacími parametry těchto sítí jsou spolehlivost, složitost a cena. Také je možné přihlížet k velikosti případných zkratových proudů během poruch.

1.3.1 Paprsková síť

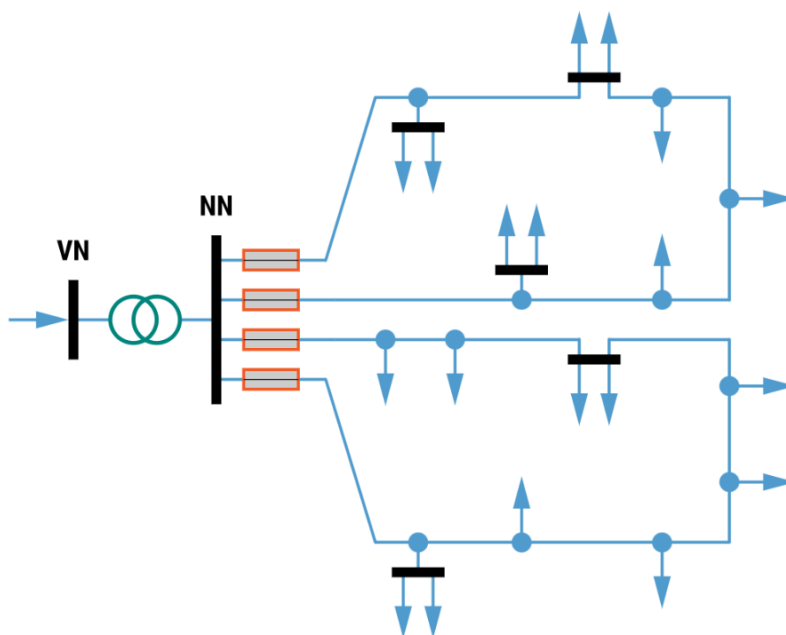
Paprsková, nebo také radiální síť, je způsob zapojení sítě, kde se od jednoho zdroje napájí odběratelé pomocí paprsků vedení, přičemž se na jednotlivých vedeních může nacházet několik odběrů. (viz Obr. 1-4) Výhodou této sítě je její jednoduchost a přehlednost, navíc oproti ostatním typům zapojení je tento způsob nejlevnější. Nevýhodou je na druhou stranu její nespolehlivost. Pokud dojde k poruše na vedení, je nutné celý zbytek vedení odpojit včetně všech následujících odběratelů. Další nevýhodou je, že pokud k dlouhému paprsku připojíme velký odběr, může na jeho konci kolísat napětí. Tento typ zapojení se nejčastěji používá v sítích nízkého napětí pro napájení odběratelů či pouličního osvětlení.



Obr. 1-4 Paprsková síť [7]

1.3.2 Okružní síť

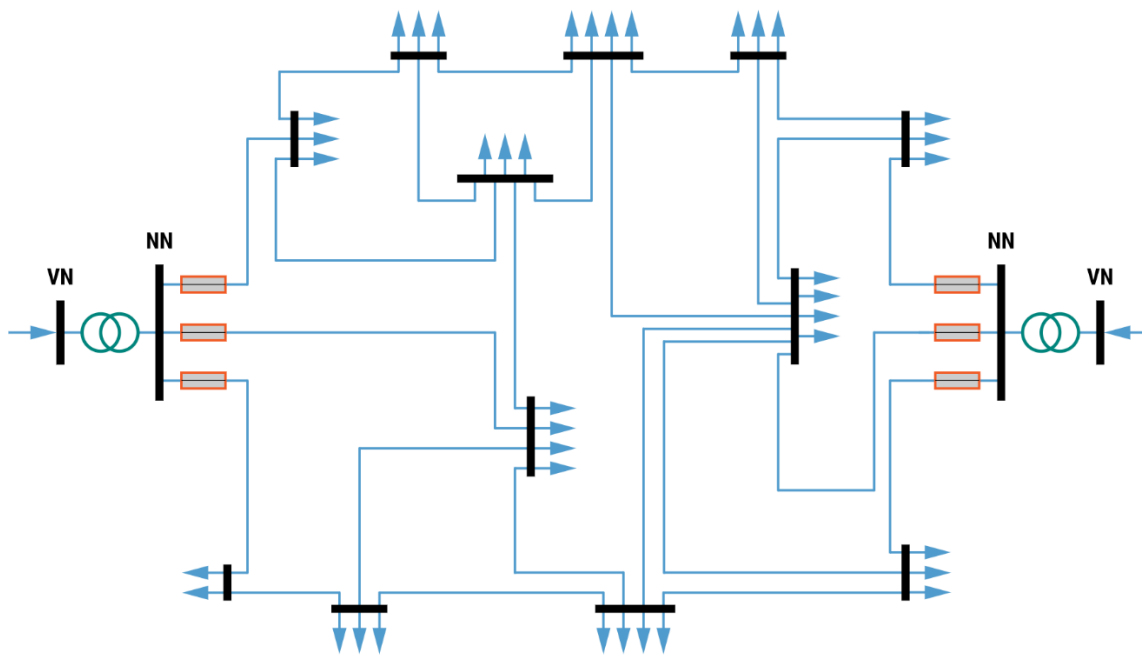
V okružním zapojení sítě je částečně minimalizován problém nespolehlivosti paprskových sítí tím, že jsou konce paprsků vzájemně propojeny neboli zasmyčkovány. (viz obr. 1-5) Tím je také sníženo kolísání napětí. Pokud se na tomto typu vedení vyskytne porucha, je možné část vedení odpojit a zbytek postižené větve napájet z obou stran tak, jak je napájena paprsková síť. Tím se zvýší spolehlivost tohoto zapojení, ale současně vzrostou náklady na výstavbu. Okružní síť je možné provozovat jako paprskovou a zapojení měnit v případě poruchy. Takto jsou zapojeni odběratelé s vyššími nároky na spolehlivost dodávky elektrické energie a také sítě na hladině 110 kV a kabelové rozvody v sítích nízkého napětí.



Obr. 1-5 Okružní síť [7]

1.3.3 Mřížová síť

Mřížová síť, někdy také nazývaná jako uzlová, je typ zapojení, kde se vzájemně propojují jednotlivé rozvaděče odběrů. (viz obr. 1-6) Síť je také napájena minimálně dvěma napájecími zdroji. Síť je charakteristická tím, že každé odběrné místo, je možné napájet alespoň ze dvou stran. Tím se značně zvyšuje její spolehlivost oproti paprskové i mřížové síti. Také je minimalizováno kolísání napětí. Nevýhodou této sítě je její vysoká cena. Tento typ sítě se nejčastěji používá v husté městské zástavbě a pro napájení odběratelů s nejvyššími nároky na spolehlivost. Díky velké variabilitě napájecích cest je možné konfigurovat napájení této sítě mnoha způsoby.



Obr. 1-6 Mřížová síť [7]

2 Obnovitelné zdroje v České republice

Trend rozvoje výroby elektrické energie pomocí obnovitelných zdrojů se v ČR a v celé Evropě stále zvyšuje. Nachází se zde větrné, vodní a fotovoltaické elektrárny, také elektrárny spalující biomasu a bioplyn. Ať už díky dotacím nebo rostoucí ceně elektrické energie si stále více lidí pořizuje fotovoltaické elektrárny. Tento obnovitelný zdroj zažívá v České republice největší nárůst. Počet registrovaných fotovoltaických elektráren v ČR překonal v roce 2021 hranici 29 000 ks. [8]

V této části práce popisují principy výroby elektrické energie pomocí obnovitelných zdrojů a také jejich zastoupení v České republice.

2.1 Vodní elektrárny

Vodní elektrárny využívají energii vody k roztáčení turbíny a následné výrobě elektřiny pomocí generátoru. Tuto vodu získávají pomocí koloběhu vody. Primárním zásobitelem energie pro tyto elektrárny je tedy sluneční záření. Tyto elektrárny neprodukují žádné emise a řadí se mezi obnovitelné zdroje energie. Využívají jak potenciální, tak kinetickou energii vody. Výhodou těchto elektráren je jejich možnost regulace a rychlé najíždění.

Podle přívodu vody se vodní elektrárny dělí na průtočné, akumulární a přečerpávací. Průtočné vodní elektrárny využívají přirozený průtok řeky k roztáčení turbíny bez akumulace. Tyto elektrárny pracují na nízkém vodním spádu. Je možné se s nimi setkat na jezu, jehož pomocí je zvednuta hladina vody nad elektrárnou, nebo je voda přivedena prostřednictvím derivačního kanálu, který zkrátí délku řeky a tím se zvýší vodní spád. Nevyužitá voda nemá možnost se akumulovat, proto volně odtéká korytem řeky. Z toho důvodu se tyto elektrárny moc neregulují, aby vyráběly maximální množství energie a používají se pro pokrytí základního zatížení spotřeby.

Akumulární vodní elektrárny využívají akumulaci vody za použití přehradní hráze. Elektrárna je většinou umístěna na spodní straně hráze, kde se nachází turbína, na kterou dopadá voda a předává jí svoji energii. Odběr vody do elektrárny je řízený. Pokud bychom elektrárnu provozovali na nízkém průtoku, přebytečná voda se naakumuluje v přehradní

nádrží a energii vody tím neztratíme. Z toho důvodu je možné tyto elektrárny více regulovat a používají se k pokrytí pološpičkového a špičkového zatížení.

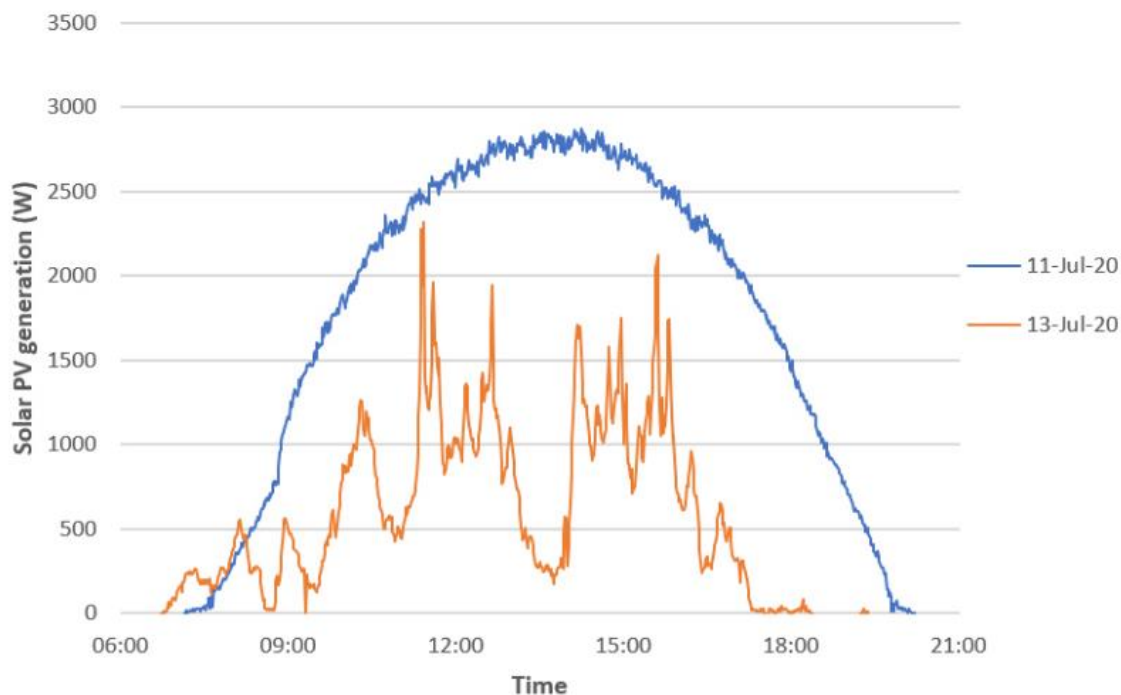
Přečerpávací vodní elektrárny se skládají ze dvou nádrží položených v různých výškách a mezi těmito nádržemi se voda přelévá. Tyto elektrárny slouží k akumulaci energie. Voda je během nízkého zatížení elektrické sítě čerpána z nižší nádrže do vyšší a během špičky je opět pouštěna do spodní nádrže, přičemž voda předává svoji energii turbíně. Používají se tedy primárně k pokrytí špičkových zatížení. [9]

V České republice bylo v roce 2016 evidováno 1614 malých vodních elektráren, které mají výkon do 10 MW, 9 velkých vodních elektráren s výkonem nad 10 MW a tři přečerpávací vodní elektrárny. Pomocí vodních elektráren bylo v roce 2021 vyrobeno 2409 MWh elektrické energie, což je zhruba 3 % celkové vyrobené energie v České republice. [9]

2.2 Fotovoltaické elektrárny

Fotovoltaické elektrárny využívají pro výrobu elektrické energie sluneční záření. Jejich princip je založen na fotoelektrickém jevu – po dopadu fotonu na polovodič se uvolní elektron a tím vznikne stejnosměrné napětí. V praxi se nejčastěji používají křemíkové destičky, které jsou vzájemně spojené tak, aby panel vytvářel požadovaný výkon. Většina zařízení ale pracuje na střídavý proud, z toho důvodu je většinou součástí fotovoltaické elektrárny také střídač. [11]

Největším problémem fotovoltaických elektráren je jejich nepredikovatelnost. Proto se začala hojně používat například bateriová úložiště, ve kterých se elektrická energie akumuluje, dokud není spotřebována. Typický průběh vyrobeného elektrického výkonu fotovoltaické elektrárny lze pozorovat v grafu na obrázku. (viz obr. 2-1) Oranžový průběh představuje den, kdy bylo oblačno a modrý průběh den, kdy bylo jasno. Z toho je patrné, že fotovoltaické elektrárny připojené do sítě bez bateriového úložiště není možné regulovat, a proto pokrývají základní zatížení.



Obr. 2-1 Průběh vyrobeného výkonu fotovoltaické elektrárny [12]

V České republice se k 31.12.2021 nacházelo 29090 fotovoltaických zdrojů s celkovým instalovaným výkonem 2,1 MW. Fotovoltaické elektrárny v roce 2021 vyrobily 2153 MWh elektrické energie, což je zhruba 3 % z celkové výroby a 20 % z výroby obnovitelných zdrojů dohromady.[8][10]

2.3 Větrné elektrárny

Větrné elektrárny využívají kinetickou energii větru pro roztočení generátoru pomocí lopatek nacházejících se na stejné hřídeli. Větrná elektrárna se skládá z dlouhého tubusu, na kterém je umístěna gondola, v níž se nachází generátor elektrické energie. Ten je na stejné hřídeli jako listy rotoru.

V dnešní době pracují větrné elektrárny primárně na principu aerodynamické vztlakové síly. Kvůli speciálnímu tvaru lopatek elektrárny a jejímu natočení vůči směru proudění větru začne na rotor působit síla podobně jako na křídla letadla. Z tohoto důvodu se začne rotor točit a generátor vyrábí elektrickou energii. Větrné elektrárny se staví v efektivních místech, kde dochází k největším vzduchovým prouděním v roce. Z toho důvodu se také staví tzv. větrné parky, což jsou shluky několika větrných turbín na jednom místě postavené tak, aby si vzájemně nesnižovaly účinnost. [13]

Hlavní nevýhodou větrných elektráren je opět jejich nestálost. Není možné úplně predikovat jejich výkon na několik dní dopředu. Z toho důvodu pokrývají pouze základní zatížení během dne a nepočítá se s jejich výkonovou regulací.

V České republice se v roce 2021 nacházelo 229 větrných elektráren s celkovým instalovaným výkonem 339,5 MW. V tomto roce větrné elektrárny vyrobily 601,5 MWh elektrické energie, což bylo zhruba 0,7 % celkové vyrobené energie a 5,7 % vyrobené energie pomocí obnovitelných zdrojů. [8][10]

2.4 Elektrárny spalující biomasu

Elektrárny, které k výrobě elektrické energie využívají spalování biomasy, pracují na stejném principu, jako elektrárny spalující fosilní paliva, ale s tím rozdílem, že neprodukují takové množství skleníkových plynů. Biomasa je pojem označující nefosilní organické materiály. Do této kategorie materiálů patří rostlinné materiály, odpady živočišné výroby a také složky komunálních a průmyslových odpadů.

Mezi nejvíce využívané zdroje biomasy patří převážně odpady lesního hospodářství a také průmyslu, který zpracovává dřevo. Dále rostlinné odpady ze zemědělství, ale také rostliny, které se pěstují přímo k energetickému využití. Během těžby dřeva vzniká přibližně třicet procent odpadu z celkové vytěžené dřevní hmoty. Nevyužitelnými částmi stromů jsou jejich větve, vrcholy, pařezy a kořeny. U dřevozpracujícího průmyslu je tento odpad tvořen odřezky, pilinami a hoblinami. V zemědělství je to pak obilní a řepková sláma nebo nepoužitelné zrní.

Před použitím je nutné biomasu zušlechtit, aby bylo jednodušší ji transportovat a vysušit. To je zajištěno jejím rozdrčením nebo slisováním do forem briket a pelet. Biomasa se následně spaluje v upravených kotlích, při čemž vzniká tepelná energie, ze které je parním cyklem získána kinetická energie a poté energie elektrická. Spalování biomasy lze také využít k centrálnímu zásobování teplem.

Biomasa obecně vzniká pomocí fotosyntézy, během které je v rostlině uchována energie ze slunečního záření a také oxid uhličitý. Z biomasy získáme energii spalováním, přičemž

se uvolní do ovzduší takové množství oxidu uhličitého, které je úměrné tomu, jaké rostlina z ovzduší přijala. Spalováním biomasy se tedy nezvyšuje množství oxidu uhličitého v atmosféře, a proto elektrárny na biomasu lze v tomto ohledu považovat za neutrální. [14]

Vzhledem k tomu, že tyto elektrárny využívají princip parního cyklu, je snadné je regulovat oproti jiným elektrárnám, které pracují na principu obnovitelných zdrojů. V České republice se v roce 2021 nacházelo 89 elektráren spalujících biomasu s instalovaným výkonem 794,8 MW. V tomto roce vyrobily 2664,6 MWh elektrické energie, což bylo zhruba 3,1 % celkové vyrobené energie a 25 % z vyrobené energie pomocí obnovitelných zdrojů. V České republice v tomto roce vyrobily nejvíce elektrické energie v porovnání s ostatními obnovitelnými zdroji. [8][10]

2.5 Bioplynové stanice

Bioplynové stanice spalují bioplyn, který se získává z biomasy. Po spalování plynu vytváří pouze teplo nebo využívají kogenerační stanice, pomocí kterých vyrábí jak tepelnou, tak elektrickou energii. Plyn můžeme označit za bioplyn, pokud vznikl během rozkladu přírodních materiálů bez přístupu vzduchu. Nejvíce obsahuje metan, ale také oxid uhličitý.

Nelze určit přesné složení bioplynu, protože záleží na způsobu výroby, ale pohybuje se v hranicích 50-80 % metanu a 20-42 % oxidu uhličitého. Během výroby bioplynu vzniká také tuhý a tekutý zbytek po vyhnutí. Tuhý zbytek lze použít jako hnojivo vysoké kvality a tekutý zbytek se většinou odvádí do čističky odpadních vod, protože má charakter odpadní vody. Bioplyn vzniká pomocí biomasy, která je umístěna ve fermentoru. Zde dochází k jejímu zahřívání bez přístupu vzduchu. Bioplyn je poté odveden do zásobníků a následně upraven na požadované vlastnosti. Z bioplynu se například odstraňuje sirovodík a čpavek. [15]

Protože bioplyn vzniká za pomoci biomasy, lze jej opět považovat za uhlíkově neutrální. Protože bioplynová teplárna využívá kogenerační stanice k výrobě elektrické energie, je možné ji přímo regulovat. V České republice se v roce 2021 nacházelo 728 zdrojů spalujících bioplyn s instalovaným výkonem 322,7 MW. V tomto roce celkově vyrobily 2592,1 MWh elektrické energie, což bylo zhruba 3 % vyrobené energie a 24,5 % celkové vyrobené energie pomocí obnovitelných zdrojů. [8][10]

3 Připojování obnovitelných zdrojů do distribuční sítě

Aby byla elektrická soustava co nejvíce stabilní, je nutné, aby se všichni uživatelé této soustavy chovali podle stejných pravidel. Z tohoto důvodu byl vydán zákon 458/2000 Sb., také nazývaný jako energetický zákon. Zákon je pravidelně upravován, aby reagoval na nové trendy v energetice, a ještě více zlepšil kvalitu elektrické sítě. Pro moji práci je nejdůležitější část zákona Hlava II, zvláštní část, díl 1, Elektroenergetika. Tato část zákona obecně stanovuje práva a povinnosti účastníků trhu s elektřinou. Dělí se na několik částí, ve kterých pojednává například o výrobcí elektřiny, provozovatelích distribuční soustavy, provozovatelích přenosové soustavy, technickém dispečinku, zákazníkovi a obchodníkovi s elektřinou. Pro moji práci je nejdůležitější část §23, která pojednává o povinnostech a právech výrobce elektřiny.

Na tento zákon navazují “Pravidla provozování distribuční soustavy“, což je soubor pravidel, která předkládají distribuční společnosti. Tato pravidla jsou schvalována Energetickým regulačním úřadem. Pro moji práci je z těchto pravidel nejdůležitější příloha 4, která se nazývá “Pravidla pro paralelní provoz výroben a akumulčních zařízení se sítí provozovatele distribuční soustavy“. [16]

3.1 Zákon 458/2000 Sb. § 23

Tato část zákona se zabývá výrobcem elektrické energie. Je rozdělena do čtyř odstavců. První odstavec pojednává o právech výrobce elektrické energie. Říká, že výrobce elektrické energie má právo na to, aby připojil své zařízení k elektrizační soustavě, ale pouze pokud splňuje podmínky k připojení a obchodní podmínky. Dále je zde řečeno, že výrobce má právo tuto elektrickou energii dodávat ostatním účastníkům trhu i jiným státům pomocí distribuční a přenosové soustavy. Pokud mu to dovolují podmínky provozování distribuční a přenosové soustavy, má také právo na to, aby vyrobenou elektrickou energii sám spotřeboval. Může také poskytovat podpůrné služby, které napomáhají k udržení provozu elektrizační soustavy, ale opět pouze pokud splňuje pravidla provozování distribuční nebo přenosové soustavy. Výrobce má také právo na to, aby omezil, přerušil nebo dokonce ukončil dodávku elektrické energie svým zákazníkům, pokud by došlo k neoprávněnému odběru elektrické energie. Posledním bodem prvního odstavce je to, že výrobce elektřiny má právo na to, aby nakupoval elektrickou energii pro vlastní spotřebu své elektrárny.

Ve druhém odstavci jsou popsány povinnosti výrobce elektřiny. Pojednává o tom, že výrobce elektřiny má povinnost zajistit si vlastnické právo k nemovitosti, na které bude výrobu elektřiny provozovat včetně staveb s elektrárnou souvisejících, pokud jde o výrobu s instalovaným výkonem 100 MW a vyšším. Pokud ale není vlastník nemovitosti znám nebo je nedosažitelný, popřípadě nečinný, vyvlastňovací úřad na návrh daného výrobce elektřiny rozhodne o odejmutí či omezení vlastnického práva k pozemku.

Třetí odstavec je rozdělen na 18 částí. Opět pojednává o povinnostech výrobce elektřiny. Výrobce musí na své náklady obstarat připojení výroby elektřiny k přenosové či distribuční soustavě. Také má povinnost, aby umožnil a uhradil instalaci zařízení pro měření provozovateli distribuční nebo přenosové soustavy, ke které je zařízení připojeno. Toto měřicí zařízení musí také provozovateli zpřístupnit. U elektráren s vyšším instalovaným výkonem, než je 30 MW, musí instalovat a provozovat zařízení podpůrných služeb. Musí se řídit technickým dispečinkem provozovatele, pod kterého výroba spadá. Operátorovi trhu, který převzal odpovědnost za jeho odchylku, má povinnost předávat technické údaje. Provozovateli soustavy musí poskytnout údaje, které jsou nutné pro provoz a rozvoj přenosové nebo distribuční soustavy, také musí operátorovi trhu poskytnout údaje, které jsou nutné pro plnění jeho povinností. Provozovateli také musí předávat všechny informace pro dispečerské řízení. Další z jeho povinností je, že se musí držet parametrů kvality dodávky elektrické energie. Finančně se také musí podílet na úhradě nákladů, které vznikají provozovateli distribuční nebo přenosové soustavy kvůli připojení elektrárny. Výrobce má povinnost podávat informace účastníkům trhu o zdrojích, které použil pro výrobu elektrické energie a také o tom, jaké množství oxidu uhličitého či radioaktivního odpadu vyprodukoval, tyto informace musí uvádět způsobem, který umožňuje dálkový přístup. Pro předcházení stavu nouze musí také nabízet nevyužité výrobní kapacity. 30 dnů od obdržení licence na výrobu elektřiny se musí zaregistrovat u operátora trhu. Také musí dodržovat zákon, který se týká obchodníků s elektřinou, pokud přímo dodává elektřinu zákazníkům. Další část říká, že je povinen poskytovat informace, které provozovateli zajistí bezpečný provoz a rozvoj soustavy.

Další část třetího odstavce je důležitá pro moji práci. Uvádí, že provozovatel zařízení vyrábějícího elektrickou energii s vyšším instalovaným výkonem, než je 100 kW, je povinen vybavit jeho výrobu zařízeními, které slouží k dispečerskému řízení elektrárny a také tato

zařízení musí udržovat v provozuschopném stavu. Tato povinnost se ale nevztahuje na výrobní elektrické energie využívající obnovitelných zdrojů, které byly uvedeny do provozu poprvé před rokem 2000 a mají instalovaný výkon nižší než 10 MW včetně. Také se nevztahuje na průtočné malé vodní elektrárny s instalovaným výkonem do 10 MW.

Třetí odstavce dále pojednává o tom, že výrobce musí 6 měsíců ode dne, kdy mu byla udělena licence zpracovat havarijní plán a každý rok ho upřesňovat. Musí při tom také spolupracovat s provozovateli distribuční či přenosové soustavy, pod které jeho výroba spadá. Na zdroje s nižším instalovaným výkonem, než je 10 MW, se tato povinnost nevztahuje. Pokud by došlo ke změnám parametrů elektrické energie, musí upravit výrobu tak, aby těmto změnám vyhovovala.

Poslední, čtvrtý odstavce říká, že výrobce elektrické energie není odpovědný za odchylku, která vznikla kvůli dispečerskému řízení výroby. [17]

3.2 Pravidla pro provozování distribuční soustavy příloha 4

Pro shrnutí jednotlivých zásad, na které je nutné dbát při provozu distribuční sítě vznikla "Pravidla pro provozování distribuční soustavy". V příloze 4 těchto pravidel je konkrétně rozebrána problematika připojování zdrojů do distribuční soustavy. Tento soubor pravidel slouží jak pro provozovatele distribuční soustavy, tak pro výrobce elektrické energie, který je do distribuční soustavy připojen. Pravidla platí pro výrobní, jakými jsou například vodní elektrárny, větrné elektrárny, fotovoltaické elektrárny, geotermální elektrárny a elektrárny poháněné teplenými ústrojími, jako jsou například spalovny biomasy, kogenerační jednotky či teplárny. Do těchto pravidel spadají i akumulární jednotky různých zařízení či výroben.

V roce 2016 vyšlo nařízení Evropské unie, které se snaží sjednotit požadavky a technické parametry výroben, s cílem zajistit bezpečný a spolehlivý provoz elektrické sítě jak při normálním provozu, tak při přechodných stavech. Nazývá se NAŘÍZENÍ KOMISE (EU) 2016/631 – RfG. Na toto nařízení se Pravidla pro provozování distribuční soustavy odvolávají. Nařízení rozděluje zdroje do jednotlivých kategorií podle jejich výkonů a udává, co tyto kategorie musí splňovat. Má práce se týká zdrojů nad 100 kW, které spadají do kategorie B1, do které jsou zařazeny zdroje s instalovaným výkonem 100-1000 kW.

Obecně je nutné, aby výrobná elektřina byla schopná dodávat do sítě elektrický výkon bez toho, aby tím zároveň rušila síť, či zařízení ostatních uživatelů sítě. Musí tedy splňovat platné zákony a normy, které se provozu výrobní týkají a připojení k síti projednat s provozovatelem distribuční soustavy. Provozovatel může v souladu se zákonem 458/2000 Sb. požadovat, aby výrobce jeho zařízení nějakým způsobem upravil, pokud to je nutné pro bezporuchový a bezpečný provoz distribuční sítě. Z toho důvodu je doporučeno, aby potenciální výrobce elektřiny jednal s provozovatelem distribuční soustavy již při vytváření plánů výrobní. Stejně tak pokud by výrobce chtěl zařízení, které má výkon vyšší než 11 kW, modernizovat, může tento krok konzultovat s provozovatelem distribuční sítě, pokud by modernizace měla vliv na síť. [16]

3.2.1 Přihlašovací řízení

Aby bylo zahájeno řízení o připojení nového zdroje do distribuční soustavy, musí být podána žádost o připojení, kterou obdrží provozovatel distribuční soustavy. Tato žádost musí být podána včas a musí splňovat Vyhlášku ERÚ č. 16/2016 Sb., ze dne 13. ledna 2016 o Podmínkách připojení k elektrizační soustavě. Také dodá katastrální mapu s vyznačeným pozemkem výrobní a výpis z katastru nemovitostí. Dále zkratové poměry předávací stanice a přesný popis ochran. Musí předat výpočet, který zahrnuje, jaký vliv bude mít jeho výrobná na distribuční síť z hlediska zkratových proudů. U střídačů také zkušební protokoly a u větrných elektráren protokol, který zahrnuje očekávané zpětné vlivy na síť. Součástí pravidel jsou také formuláře, které je nutné vyplnit a k žádosti přiložit. Provozovatel distribuční soustavy poté posoudí, zda je možné zdroj připojit a navrhne žadateli smlouvu o připojení. [16]

3.2.2 Připojení k síti

Připojení výroben do distribuční sítě lze připojit v odběrném místě, v předávacím místě jiné výrobní nebo přímo k distribuční síti. Výrobní elektrické energie v kategorii B1 musí být vybaveny vypínačem s dálkovým ovládním. Tyto výrobní musí na vypínací signál reagovat do pěti vteřin od obdržení signálu. Taky musí být schopné reagovat na signál, který předává informaci o změně jejich činného výkonu. Synchronní výrobní do pěti minut a

nesynchronní výroby do jedné minuty od obdržení signálu, přičemž odchylka reálného výkonu od požadovaného je maximálně 5 %.

V této části přílohy 4 pravidel pro provozování distribuční sítě je také uveden seznam měření a signalizací, které musí zdroje předávat provozovateli distribuční soustavy. Patří mezi ně například činný a jalový výkon, svorkové napětí, vlastní spotřeba, stavy vypínačů a odpojovačů a zadané hodnoty provozu. Dále jsou zde uvedena pravidla pro provoz akumulčních prvků v síti.

Další kapitoly se týkají pravidly pro elektroměry, měřicí a signalizační prvky. Dále jsou zde uvedena pravidla pro spínací zařízení. Důležitá kapitola se týká ochran ve výrobním zařízení. Jsou zde uvedeny hodnoty frekvencí a napětí, kdy je nutné zdroj odpojit od sítě, aby nebyly porušeny normy pro kvalitu napětí v síti. Nastavení ochran udává provozovatel distribuční sítě. Výrobce si ale musí zařídit sám, aby poruchy, které mohou nastat v distribuční síti, neohrozily a neporušily jeho zařízení. [16]

3.2.3 Provoz výroben v distribuční síti

Výroby elektrické energie se nesmí odpojit od distribuční sítě, pokud by došlo k odchylce frekvence do hodnoty 2 Hz/s. Také musí vydržet být v provozu minimálně 30 minut při frekvenci v rozsahu 47,5-48,5 Hz a 51-51,5 Hz. Pro rozsah frekvence 48,5-49 Hz se nesmí odpojit dříve než za 90 minut a v rozsahu 49-50 Hz musí být jejich provoz časově neomezený.

Je zde také uvedena tabulka, která udává, pro jaká napětí musí výroby připojené do hladiny vysokého napětí udržet dodávaný výkon a po jak dlouhou dobu. Pro rozsah napětí 0,85-0,9 a 1,118-1,15 násobku jmenovitého napětí po dobu minimálně 60 minut a v rozsahu 0,9-1,118 násobku jmenovitého napětí po neomezenou dobu. [16]

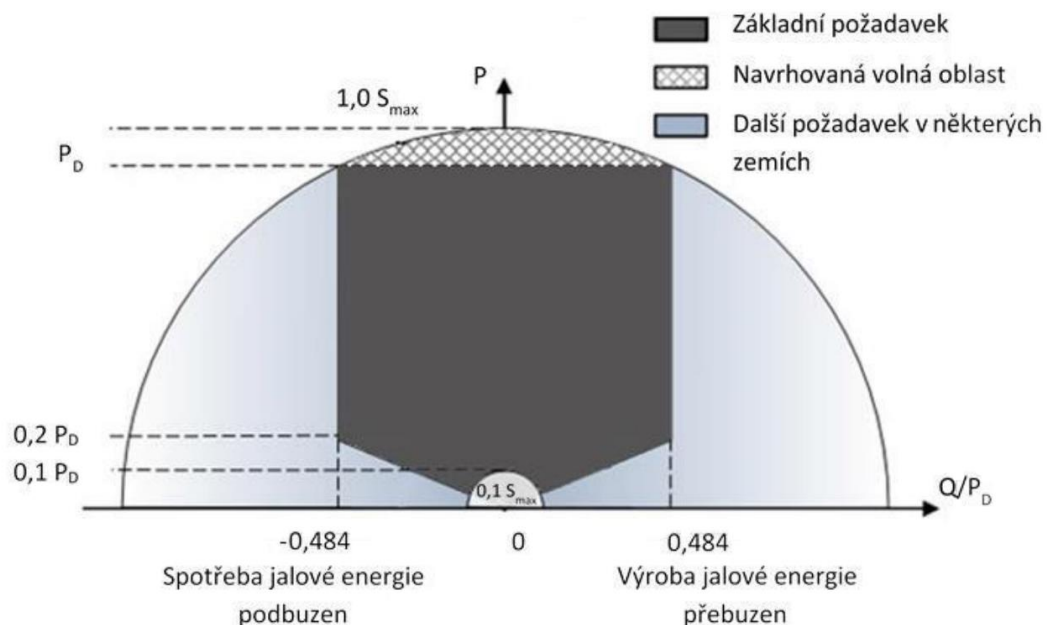
3.2.4 Zásady podpory sítě

Výrobní elektrické energie musí spolupracovat s provozovatelem distribuční sítě na udržování kvality napětí. Tato podpora sítě se rozděluje na statickou a dynamickou. Požadované parametry a charakteristiky pro řízení určuje provozovatel distribuční sítě. Tyto parametry jsou poté zajištěny automatickým řízením výroby, přičemž podrobné požadavky jsou specifikovány ve smlouvě o připojení výroby.

3.2.4.1 Statická podpora napětí

Statickou podporou napětí je označena regulace výroby v běžných provozních stavech při pomalých změnách napětí, kdy se výrobní parametry elektrárny pohybují ve smluvně stanovených mezích. Odchyłky od těchto parametrů se musí stále nacházet v povolených mezích.

Výrobní v kategorii B1 musí být schopny v tomto stavu regulovat výkon podle PQ diagramu. (viz obr. 3-1)



Obr. 3-1 PQ diagram výroben v kategorii B1 [16]

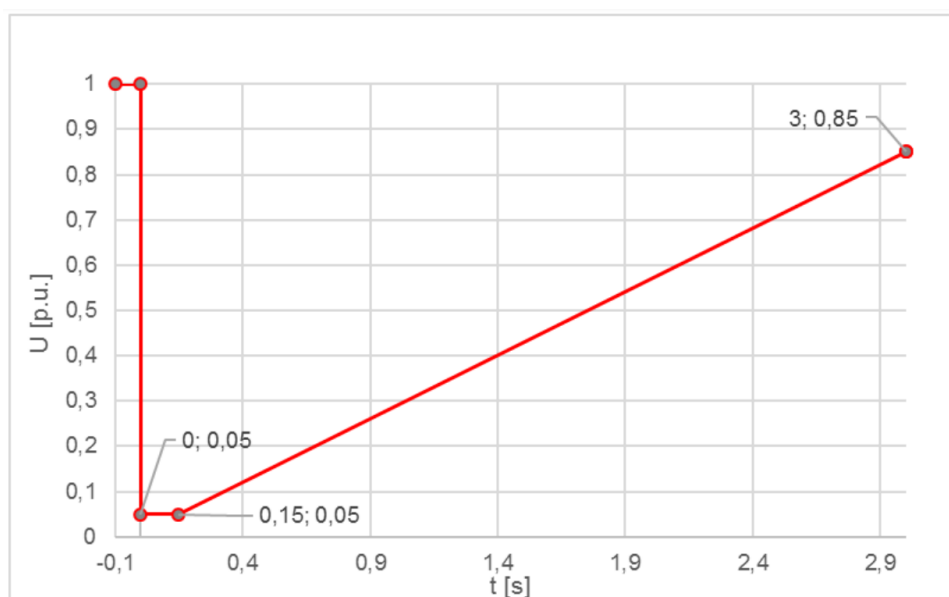
To, jakým způsobem se bude jalový výkon regulovat a v jakých mezích je regulace nutná určuje provozovatel distribuční soustavy v technických podmínkách připojení. [16]

3.2.4.2 Dynamická podpora napětí

Dynamická podpora sítě je označení pro regulování výroby při stavu, kdy dojde k poklesu napětí v síti na hladině velmi vysokého a zvláště vysokého napětí. Tímto opatřením je zajištěno, aby se během poruchových stavů neodpojovaly zdroje na hladinách nízkého a vysokého napětí, čímž by mohlo dojít k rozpadu sítě. Znamená to, že výroby na těchto hladinách napětí musí být schopné dodávat elektrickou energii do sítě i při poruchových stavech, při kterých dojde k poklesu napětí, což se týká všech druhů zkratů.

Pro elektrárny připojené do sítě na hladině nízkého napětí na hodnotu nejmenšího fázového napětí. V případě, že se v síti nenachází střední vodič, hodnotí se nejnižší sdružené napětí. Pro výroby v sítích vysokého napětí a na hladině 110 kV platí, že pro hodnocení poruchy se hodnotí nejnižší sdružené napětí.

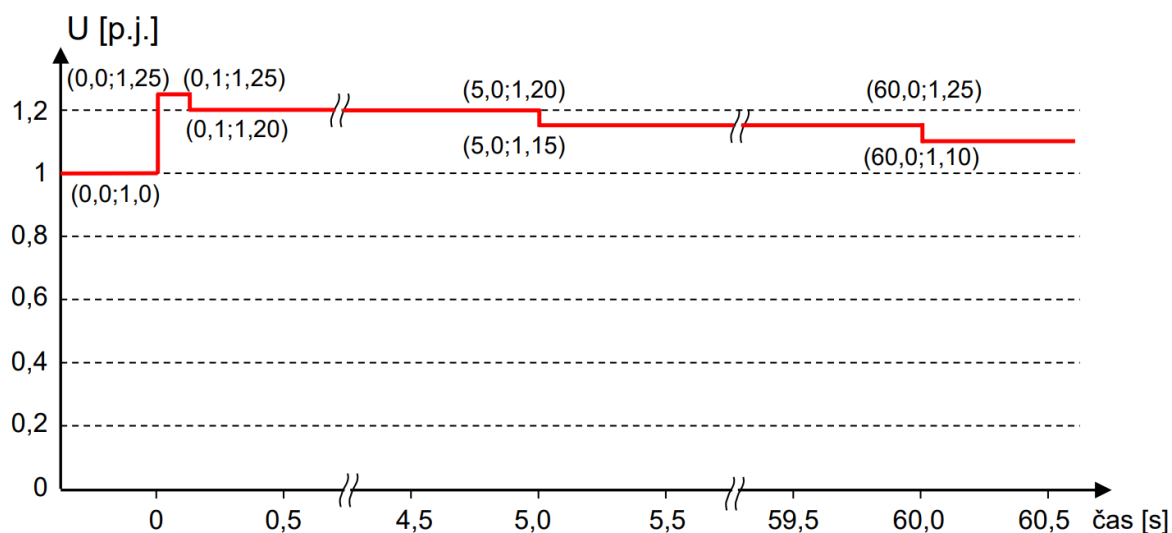
Parametry poruch, při kterých je nutné, aby výroba zůstala v provozu se vynášení na takzvanou FRT křivku, což je anglická zkratka „fault-ride-through“, v češtině se používá pojem překlenutí poklesu napětí. Nesynchronní výroby v kategorii B1 musí splňovat tuto FRT křivku. (viz obr. 3-2)



Obr. 3-2 FRT křivka výroben v kategorii B1 [16]

To tedy znamená, že výrobná, kterou se zabývá má diplomová práce musí být schopna dodávat do sítě elektrickou energii po dobu 0,15 s při poruše, kdy dojde k poklesu napětí na 0,05 % jmenovité hodnoty napětí. Po uplynutí této doby musí být schopna nadále dodávat energii do sítě, pokud se bude napětí zvyšovat, jak je znázorněno na FRT křivce.

Stejně tak je nutné, aby zůstaly zdroje připojené, pokud dojde ke zvýšení napětí nad jmenovitou úroveň. U sítí nízkého napětí se vyhodnocuje nejvyšší fázové napětí, popřípadě pokud se zde nenachází střední vodič, tak nejvyšší sdružené napětí. U sítí vysokého napětí a na hladině 110 kV se hodnotí velikost nejvyššího sdruženého napětí. Zdroje v kategorii B1 se musí řídit touto křivkou. (viz obr. 3-3)



Obr. 3-3 Křivka zvýšení napětí výroben v kategorii B1 [16]

Pokud je výrobná připojena k síti s automatikou opětovného zapínání, musí k jejímu odpojení dojít v době, kdy je cyklus ve stavu beznapěťové přestávky. Provozovatel distribuční sítě určí, které výrobný se budou muset podílet na dynamické podpoře sítě.

Po odeznění poruchy, která nevedla k vypnutí elektrárny, musí nesynchronní výrobná opět navrátit velikost vyráběného výkonu do původního bezporuchového stavu, nebo na maximální hodnotu vyráběného výkonu. Tento proces musí nastat maximálně do jedné sekundy od doby, kdy se napětí v místě připojení výrobný vrátilo na hodnotu 85 %. Dovolená odchylka výkonu od předchozího stavu je +/-5 %. Pokud však výrobná dodávala při poruše primárně jalový výkon, obnova bezporuchového stavu nastane, až když napětí

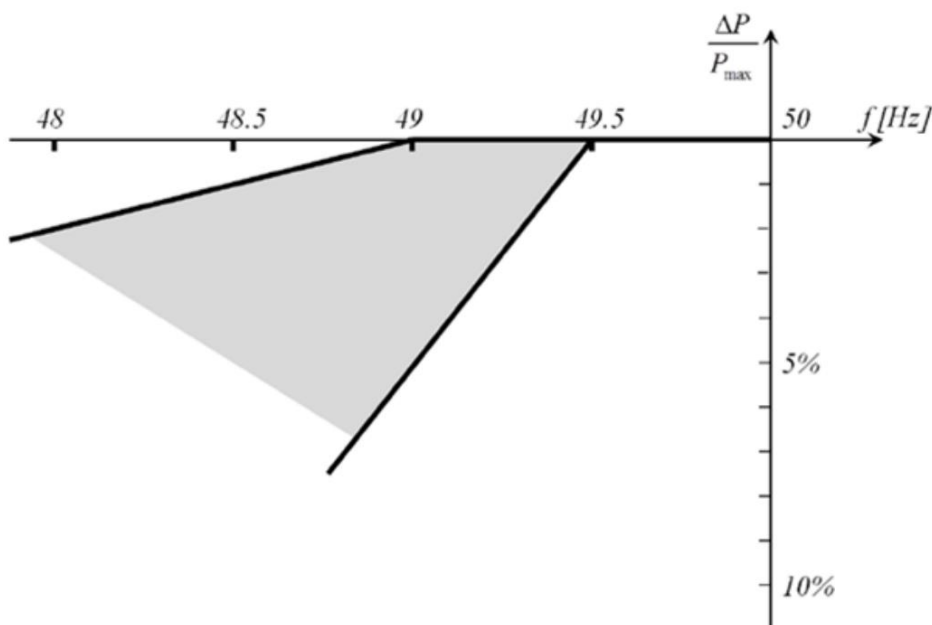
dosáhne 95 % jmenovité hodnoty a tato obnova potrvá maximálně 1 vteřinu. Při poruše musí nesynchronní výrobní kategorie B1 dodávat do sítě prioritně jalový výkon. [16]

3.2.5 Řízení činného výkonu

Výrobní všech kategorií musí být schopné automaticky snižovat výrobu činného výkonu v závislosti na frekvenci distribuční sítě. Také v návaznosti na stavy v síti musí reagovat na pokyny z dispečinku provozovatele distribuční soustavy, nebo se automaticky odpojí od sítě.

Provozovatel distribuční soustavy stanoví, v jakých mezích se bude nacházet prahová frekvence výrobní, při které musí dojít ke snížení dodávky činného výkonu. Hodnota prahové frekvence se musí nacházet mezi 50,05 a 50,5 Hz. Výchozí prahová frekvence v České republice je 50,2 Hz.

Provozovatel distribuční sítě také stanoví, na jakou hodnotu může elektrárna snížit výrobu činného výkonu při poklesu frekvence. Tyto meze stanoví v rozsahu, který jsem uvedl v grafu. (viz obr. 3-4)



Obr. 3-4 Meze výroby činného výkonu s poklesem kmitočtu [16]

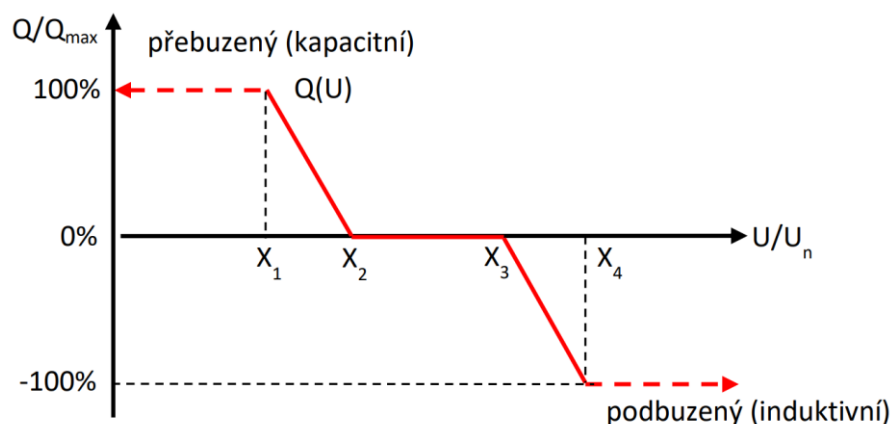
Výrobní elektrické energie kategorie B1 musí být v provozu i při sníženém činném výkonu a obsahovat vstupní port, který reaguje na příkazy od provozovatele distribuční soustavy snížením činného výkonu. K tomu má provozovatel právo, pokud dojde k různým stavům na síti. Například kvůli předcházení blackoutu, vzrůstu frekvence nebo provedení údržby na distribuční soustavě. Poté je možné, aby provozovatel požadoval snížení výroby činného výkonu nebo odpojení výrobní od sítě. Toto snížení výkonu musí být provedeno maximálně do jedné minuty. [16]

3.2.6 Řízení jalového výkonu

Řízení jalového výkonu závisí primárně na místě, kde je výrobní připojena. Podmínky řízení jalového výkonu určuje provozovatel distribuční soustavy po domluvě s výrobcem elektrické energie. U výroben s výkonem do 100 kVA je jalový výkon řízen samostatně výrobní, ale provozovatel distribuční soustavy zadá jeden z možných způsobů, jakým se bude regulace řídit. Tyto způsoby zadání řízení velikosti jalového výkonu jsou následující. Výrobní může pracovat s pevně zadanou velikostí jalového výkonu, který bude vyrábět. Také je možné, že bude jalový výkon regulovat v závislosti na napětí nebo činném výkonu. Další z možností je regulace, kdy je pevně zadaná hodnota účinníku, kterou musí výrobní splňovat. Také je možné řídit jalový výkon pomocí řízení účinníku v závislosti na napětí nebo na činném výkonu. Poslední možnost řízení je zadáním pevné hodnoty napětí výrobní.

Po zadání způsobu řízení jalového výkonu provozovatel distribuční soustavy zadá také, za jak dlouhou dobu musí být výrobní schopná tuto hodnotu jalového výkonu automaticky nastavit. Pro řízení účinníku v závislosti na napětí je maximální doba nastavení dodávky do deseti sekund. Pro řízení jalového výkonu v závislosti na napětí určuje provozovatel distribuční soustavy reakční dobu mezi deseti a šedesáti sekundami. Žádané hodnoty jalového výkonu jsou zadány pro každou výrobní zvlášť. Tyto hodnoty získává výrobce on-line zadáváním nebo dohodou na hodnotě nebo harmonogramu.

Často používaná regulace je zadávání hodnoty jalového výkonu v závislosti na napětí. Tento typ regulace se řídí křivkou. (viz obr. 3-5) Tato charakteristika musí být nastavitelná v závislosti na tom, jaké podmínky určí provozovatel distribuční soustavy v daném místě připojení.



Obr. 3-5 Charakteristika řízení jalového výkonu v závislosti na napětí [16]

Na této křivce se nachází čtyři důležité body označené písmeny X. V bodě X_1 je hodnota poměru měřeného napětí vůči jmenovitému menší než jedna a zároveň této hodnotě odpovídá nejvyšší nastavitelný jalový výkon výroby elektrické energie. V bodě X_2 je hodnota poměru napětí opět menší než jedna a tento bod odpovídá nejnižšímu možnému napětí, kdy ještě není jalový výkon dodáván. Bod X_3 popisuje obdobnou situaci, ale pro případ, kdy je poměr napětí vyšší než jedna, ale výroba ještě jalový výkon pro snížení napětí neodebírání. Bod X_4 odpovídá stavu, kdy je hodnota poměru měřeného a jmenovitého napětí vyšší než jedna a označuje maximální odebíraný jalový výkon výrobnou pro snížení napětí. Tyto body zadává provozovatel distribuční soustavy.

Pokud dojde ke skokové změně napětí, musí nesynchronní výroba dosáhnout alespoň devadesáti procent změny jalového výkonu za čas, který určí provozovatel distribuční soustavy v rozmezí 1 až 5 sekund. Také se musí na hodnotě ustálit do doby mezi 5 až 60 sekundami s maximální odchylkou 5 %. Tyto hodnoty opět stanoví provozovatel distribuční sítě. [16]

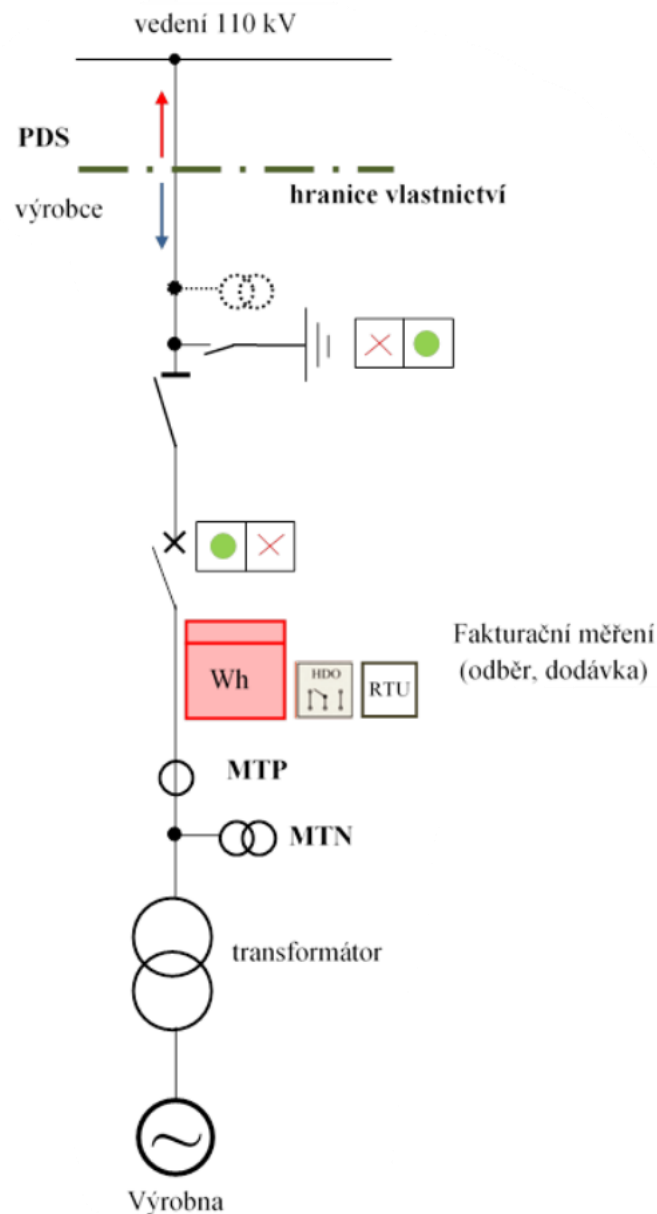
3.2.7 Možnosti připojení obnovitelných zdrojů do distribuční sítě

Způsobů připojení zdrojů elektrické energie do distribuční sítě uvádí provozovatelé distribuční soustavy v příloze 4 několik. V zásadě jsou rozděleny na zdroje připojené do hladin nízkého napětí a do hladin vysokého napětí. Také je použit jiný způsob připojení,

3 PŘIPOJOVÁNÍ OBNOVITELNÝCH ZDROJŮ DO DISTRIBUČNÍ SÍTĚ

pokud obsahují akumulační zařízení, či nikoliv. Další rozdíly v připojení nastávají, pokud se elektrárna připojuje přímo na vedení distribuční soustavy nebo na přípojnici v rozvodně.

Pro moji práci je nejvhodnější připojení zdroje do distribuční sítě pomocí připojení, které je v pravidlech provozu distribuční sítě označené jako “Připojení výroben jednoduchým T odbočením k vedení 110 kV“. Tento způsob připojení uvádím na obrázku. (viz obr. 3-6)



Obr. 3-6 Schéma připojení výroben jednoduchým T odbočením k vedení 110 kV [16]

4 Principy regulace napětí a jalového výkonu v distribuční síti

Regulování jalového výkonu a napětí v distribučních sítích je jedním z velice důležitých úkolů, který provozovatel distribuční soustavy zajišťuje. Díky této regulaci se zvyšuje hospodárnost provozu elektrizační soustavy, také umožňuje regulaci ztrát na vedení, zajišťuje bezpečnost provozu a stabilitu napětí. Napětí a jalový výkon jsou úzce spojené veličiny, které spolu zajišťují kvalitu napětí v předávacím místě. Napětí není ve všech místech distribuční sítě stejné, a proto jej označujeme jako lokální veličinu. Z toho důvodu i regulace napětí probíhá na lokální úrovni. V České republice se využívá regulace v takzvaných pilotních uzlech, v nichž je napětí řízeno. Řízení je provedeno pomocí akčních prvků, které injektují do uzlů jalové výkony. Regulace je provedena například pomocí synchronních generátorů, změny převodu transformátorů a pomocí kompenzačních zařízení. [18]

4.1 Regulace napětí

Napětí v distribuční síti je nutné regulovat, aby zákazník přijímal elektrickou energii s parametry, které jsou určeny normou ČSN EN 50160. Mezi parametry, které tato norma udává patří i napětí, které se musí pohybovat v určitých mezích. Tyto meze popisují v tabulce 4.1.

Tabulka 4.1- Dovolený rozsah napěťových hladin dané normou ČSN EN 50160

Napěťová hladina	DOVOLENÝ ROZSAH
0,4 kV	0,4 kV ± 10 %
22 kV	22 kV ± 10 %
35 kV	35 kV ± 10 %
110 kV	110 kV ± 10 %

Napětí je nutné regulovat, protože na vedení elektrického výkonu vzniká úbytek napětí, což je rozdíl napětí mezi začátkem a koncem vedení a je definován vztahem:

$$\Delta U_f = R \cdot I \cdot \cos(\varphi) + X \cdot I \cdot \sin(\varphi), \quad (4.1)$$

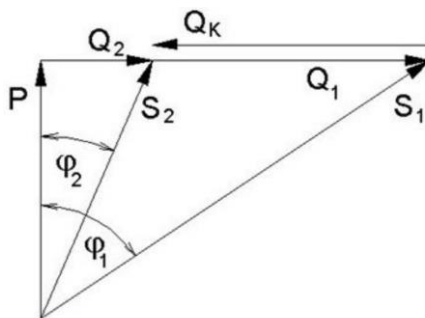
kde ΔU_f je úbytek fázového napětí, R je činný odpor vedení, I je proud protékající vedením, φ je fázový posuv a X je reaktance vedení.

Z tohoto vztahu je patrné, že úbytek napětí je ovlivněn odporem a reaktancí vodičů vedení. Také je možné jej ovlivnit při změně protékajícího proudu nebo fázového posuvu. Další z možností, jak měnit napětí na vedení, je změnou odboček na transformátoru. Pokud by napětí v místě odběru nebylo v rozmezí dané normou, změníme odbočku transformátoru tak, aby se hodnota napětí snížila, či zvýšila. Nutné je tuto regulaci používat tak, aby například při zvýšení napětí nedošlo k překročení limitní hodnoty na začátku vedení. Pokud by k tomu docházelo, je nutné zvýšit průřez použitého vodiče vedení, čímž se sníží jeho odpor. [19]

4.2 Regulace jalového výkonu

Další způsob, jak lze napětí na síti regulovat je pomocí řízení jalového výkonu. Protože je úbytek napětí závislý i na fázovém posuvu, můžeme ho měnit a tím měnit napěťové poměry na síti. Pokud se fázový posuv φ blíží devadesáti stupňům, hodnota $\sin(\varphi)$ se poté blíží k nule a je možné zanedbat úbytek napětí vzniklý na reaktanci vedení.

Z tohoto důvodu se jalový výkon v distribuční síti řídí, aby nedocházelo k velkým úbytkům napětí na vedení a tím se nesnižoval maximální výkon, který je možný pomocí vedení přenášet. Nejčastěji se pro omezení jalového výkonu používá princip kompenzace. Je to běžná součást většiny průmyslových závodů, ve kterých se nachází velké elektrické motory. Princip kompenzace spočívá v tom, že když připojíme do obvodu s cívkou kondenzátor se srovnatelně velkou reaktancí, jejich reaktance se odečítají a tím se fázový posuv φ sníží. Z hlediska výkonových poměrů tento jev uvádím na obrázku. (viz obr. 4-1)



Obr. 4-1 Fázorový diagram výkonových poměrů po kompenzaci [20]

Po připojení kompenzačního kondenzátoru Q_K došlo ke snížení odebíraného jalového výkonu z hodnoty Q_1 na hodnotu Q_2 , čímž se snížil fázový posuv z hodnoty φ_1 na hodnotu

φ_2 . Díky této aplikaci by následně došlo ke snížení úbytku napětí na vedení. V praxi se kompenzace provozuje pro hodnotu $\cos(\varphi) \geq 0,95$.

Další ze způsobů, jakým je možné kompenzovat jalový výkon, je použití statického synchronního kompenzátoru. Tento typ kompenzace obsahuje výkonové součástky, které dokáží generovat napětí a proud se zadaným fázovým posuvem. Tato schopnost je využitelná také u střídačů, které jsou nutnou součástí fotovoltaických elektráren, proto je zde tento způsob kompenzace hojně používán. Navíc je možné tento systém dálkově ovládat, a proto splňuje požadavky z přílohy 4 pravidel provozování distribuční soustavy. [21]

4.3 Nabíjecí kapacitní proud kabelové sítě

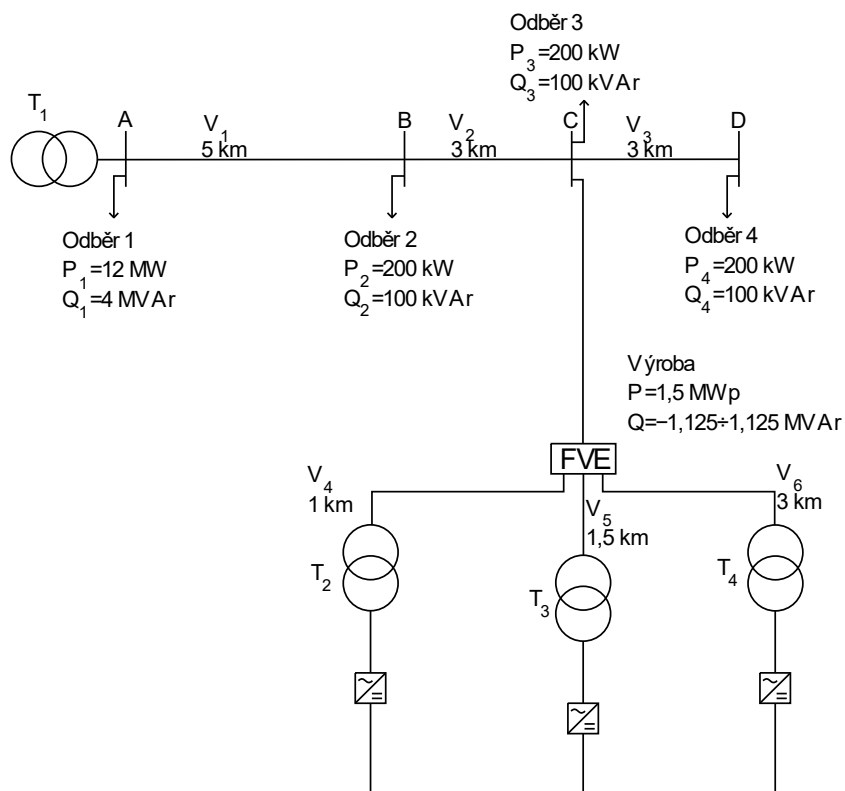
Kabelové vedení se používá tam, kde nelze z bezpečnostních, prostorových nebo jiných důvodů použít venkovní vedení. Často se také používá pro připojení výroben elektrické energie do distribuční soustavy. Protože se kabel chová jako kondenzátor, který má elektrody tvořené žilami kabelu a dielektrikum kabelovou izolací, jeví se jako kapacitní zátěž. Kapacitní impedance kabelového vedení je mnohem větší než u venkovního vedení, protože mezi vodiči je menší vzdálenost a permitivita izolace kabelu je větší než permitivita vzduchu u venkovního vedení. Kvůli kapacitnímu charakteru nabíjecího proudu u kabelových vedení je často nutné provádět kompenzaci. Nabíjecí proud kabelového vedení je možné spočítat podle vztahu:

$$i_c = \omega \cdot C_{km} \cdot \frac{U_s}{\sqrt{3}} \quad (4.2)$$

kde i_c je poměrná hodnota kapacitního proudu na kilometr délky kabelu, ω je úhlová frekvence, C_{km} je poměrná hodnota provozní kapacity kabelu na kilometr a U_s je sdružené napětí. [22]

5 Návrh připojení zdroje do sítě

V této části diplomové práce se věnuji konkrétní případové studii, kde na teoretickém připojení fotovoltaické elektrárny do distribuční sítě popíši, jaký má vnořený zdroj vliv na chování sítě. Po konzultaci s panem doktorem Žákem jsme vybrali zapojení, na kterém budou vlivy fotovoltaické elektrárny nejvíc patrné. (viz obr. 5-1)



Obr. 5-1 Zapojení fotovoltaické elektrárny v distribuční síti

Fotovoltaická elektrárna bude připojena do distribuční sítě 22 kV, kde se již nachází 4 odběry elektrické energie. Navrhnou jednotlivé kabely a transformátory, které budou v síti použity, poté spočítám nabíjecí výkony kabelů a ztráty na prvcích sítě a následně spočítám, jak bude situace v síti z hlediska napětí v jednotlivých uzlech a ztrátách vypadat, dle chování fotovoltaické elektrárny.

5.1 Výběr prvků sítě a jejich parametry

Pro vedení V_1 , V_2 a V_3 jsem zvolil silový kabel s označením 22-AXEKVCEY 1x120/16 C, který je dimenzovaný na hladinu 22kV a je schopný přenášet zvolené výkony. Jedná se o hliníkový kabel s průřezem 120 mm². Důležité parametry tohoto kabelu jsem sepsal v tabulce 5.1.

Tabulka 5.1- Parametry kabelu 22-AXEKVCEY 1x120/16 C

Parametr	Hodnota
Činný odpor při 20 °C	0,253 Ω/km
Kapacita	0,23 μF/km
Indukčnost v zemi	0,64 mH/km

Vedeními V_4 , V_5 a V_6 již nepotečou tak velké proudy, z toho důvodu bude stačit použít kabel s menším průřezem 70 mm². Jedná se o kabel 22-AXEKVCEY 1x70/16 C. Tento kabel má parametry, které jsem sepsal v tabulce 5.2.

Tabulka 5.2- Parametry kabelu 22-AXEKVCEY 1x70/16 C

Parametr	Hodnota
Činný odpor při 20 °C	0,443 Ω/km
Kapacita	0,19 μF/km
Indukčnost v zemi	0,69 mH/km

Dále bylo nutné vybrat z katalogu transformátor T_1 . Vybral jsem transformátor s převodem 110/22 kV, který má výkon 25 MVA. V katalogu firmy ETD transformátory jsem našel důležité parametry, které jsem sepsal v tabulce 5.3.

Tabulka 5.3- Parametry transformátoru 110/22 kV 25 MVA

Parametr	Hodnota
Napětí nakrátko	11 %
Proud naprázdno	2 %
Ztráty nakrátko	81 kW
Ztráty naprázdno	15 kW

Pro transformátory T1, T2 a T3 jsem vybral zařízení z katalogu firmy Elpro-Energo. Transformátory mají výkon 630 kVA a jsou typu DOTEL 630H/20. Jejich parametry jsem popsal v tabulce 5.4.

Tabulka 5.4- Parametry transformátoru DOTEL 630H/20

Parametr	Hodnota
Napětí nakrátko	4 %
Ztráty nakrátko	6500 W
Ztráty naprázdno	600 W

5.2 Dopočet parametrů vedení

Pro výpočet ztrát na vedení a nabíjecích výkonů kabelů je nutné dopočítat parametry, které se ve vztazích používají. Jedná se o celkový odpor vedení, jeho reaktanci a nabíjecí proud. Odpor kabelu spočítám pomocí poměrného odporu na kilometr a délky kabelu podle následujícího vztahu:

$$R_v = R_{km} \cdot l, \quad (5.1)$$

kde R_v je celkový odpor vedení, R_{km} je odpor vedení na kilometr délky a l je délka vedení. Reaktanci vedení spočítám pomocí poměrné indukčnosti kabelu na kilometr, kterou vynásobím úhlovou frekvencí, čímž získám poměrnou reaktanci vedení, kterou poté vynásobím délkou kabelu podle následujícího vztahu:

$$X_v = L_{km} \cdot \omega \cdot l = L_{km} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot l, \quad (5.2)$$

kde X_v je celková reaktance vedení, L_{km} je indukčnost vedení na kilometr délky, ω je úhlová frekvence proudu, l je délka vedení a f je frekvence proudu.

Nabíjecí proud kabelů spočítám dle vztahu 4.2, pouze musím vztah rozšířit o délku vedení. Z nabíjecího proudu následně vypočítám nabíjecí výkon kabelu pomocí následujícího vztahu:

$$Q_c = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot i_c, \quad (5.3)$$

kde Q_c je nabíjecí výkon kabelu, U_n je sdružené napětí a i_c je nabíjecí proud kabelu.

Nyní do vztahů dosadím a spočtu parametry jednotlivých vedení.

Výpočet parametrů pro vedení V₁:

$$R_{v1} = R_{km1} \cdot l_1 = 0,253 \cdot 5 = 1,265 \Omega \quad (5.4)$$

$$\begin{aligned} X_{v1} &= L_{km1} \cdot \omega \cdot l_1 = L_{km1} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot l_1 \\ &= 0,64 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 5 = 0,6032 \Omega \end{aligned} \quad (5.5)$$

$$\begin{aligned} i_{c1} &= 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_{km1} \cdot l_1 \cdot \frac{U_s}{\sqrt{3}} = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,23 \cdot 10^{-6} \cdot 5 \cdot \frac{22 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} \\ &= 4,5889 \text{ A} \end{aligned} \quad (5.6)$$

$$\begin{aligned} Q_{c1} &= \sqrt{3} \cdot U_n \cdot i_{c1} = \sqrt{3} \cdot 22 \cdot 10^3 \cdot 4,5889 = 174861,0471 \text{ VAr} \\ &= 174,861 \text{ kVAr} \end{aligned} \quad (5.7)$$

Výpočet parametrů pro vedení V₂:

$$R_{v2} = R_{km2} \cdot l_2 = 0,253 \cdot 3 = 0,759 \Omega \quad (5.8)$$

$$\begin{aligned} X_{v2} &= L_{km2} \cdot \omega \cdot l_2 = L_{km2} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot l_2 \\ &= 0,64 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 3 = 0,6032 \Omega \end{aligned} \quad (5.9)$$

$$\begin{aligned} i_{c2} &= 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_{km2} \cdot l_2 \cdot \frac{U_s}{\sqrt{3}} = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,23 \cdot 10^{-6} \cdot 3 \cdot \frac{22 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} \\ &= 2,7533 \text{ A} \end{aligned} \quad (5.10)$$

$$\begin{aligned} Q_{c2} &= \sqrt{3} \cdot U_n \cdot i_{c2} = \sqrt{3} \cdot 22 \cdot 10^3 \cdot 2,7533 = 104916,6283 \text{ VAr} \\ &= 104,9166 \text{ kVAr} \end{aligned} \quad (5.11)$$

Výpočet parametrů pro vedení V₃:

$$R_{v3} = R_{km3} \cdot l_3 = 0,253 \cdot 3 = 0,759 \Omega \quad (5.12)$$

$$\begin{aligned} X_{v3} &= L_{km3} \cdot \omega \cdot l_3 = L_{km3} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot l_3 \\ &= 0,64 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 3 = 0,6032 \Omega \end{aligned} \quad (5.13)$$

$$\begin{aligned} i_{c3} &= 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_{km3} \cdot l_3 \cdot \frac{U_s}{\sqrt{3}} = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,23 \cdot 10^{-6} \cdot 3 \cdot \frac{22 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} \\ &= 2,7533 \text{ A} \end{aligned} \quad (5.14)$$

$$\begin{aligned} Q_{c3} &= \sqrt{3} \cdot U_n \cdot i_{c3} = \sqrt{3} \cdot 22 \cdot 10^3 \cdot 2,7533 = 104916,6283 \text{ VAr} \\ &= 104,9166 \text{ kVAr} \end{aligned} \quad (5.15)$$

Výpočet parametrů pro vedení V₄:

$$R_{v4} = R_{km4} \cdot l_4 = 0,443 \cdot 1 = 0,443 \Omega \quad (5.16)$$

$$\begin{aligned} X_{v4} &= L_{km4} \cdot \omega \cdot l_4 = L_{km4} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot l_4 \\ &= 0,69 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 1 = 0,2168 \Omega \end{aligned} \quad (5.17)$$

$$\begin{aligned} i_{c4} &= 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_{km4} \cdot l_4 \cdot \frac{U_s}{\sqrt{3}} = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,19 \cdot 10^{-6} \cdot 1 \cdot \frac{22 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} \\ &= 0,7582 A \end{aligned} \quad (5.18)$$

$$\begin{aligned} Q_{c4} &= \sqrt{3} \cdot U_n \cdot i_{c4} = \sqrt{3} \cdot 22 \cdot 10^3 \cdot 0,7582 = 28890,0860 \text{ VAr} \\ &= 28,8901 \text{ kVAr} \end{aligned} \quad (5.19)$$

Výpočet parametrů pro vedení V₅:

$$R_{v5} = R_{km5} \cdot l_5 = 0,443 \cdot 1,5 = 0,6645 \Omega \quad (5.20)$$

$$\begin{aligned} X_{v5} &= L_{km5} \cdot \omega \cdot l_5 = L_{km5} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot l_5 \\ &= 0,69 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 1,5 = 0,3252 \Omega \end{aligned} \quad (5.21)$$

$$\begin{aligned} i_{c5} &= 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_{km5} \cdot l_5 \cdot \frac{U_s}{\sqrt{3}} = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,19 \cdot 10^{-6} \cdot 1,5 \cdot \frac{22 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} \\ &= 1,1373 A \end{aligned} \quad (5.22)$$

$$\begin{aligned} Q_{c5} &= \sqrt{3} \cdot U_n \cdot i_{c5} = \sqrt{3} \cdot 22 \cdot 10^3 \cdot 1,1373 = 43335,1291 \text{ VAr} \\ &= 43,3351 \text{ kVAr} \end{aligned} \quad (5.23)$$

Výpočet parametrů pro vedení V₆:

$$R_{v6} = R_{km6} \cdot l_6 = 0,443 \cdot 3 = 1,329 \Omega \quad (5.24)$$

$$\begin{aligned} X_{v6} &= L_{km6} \cdot \omega \cdot l_6 = L_{km6} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot l_6 \\ &= 0,69 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 3 = 0,6503 \Omega \end{aligned} \quad (5.25)$$

$$\begin{aligned} i_{c6} &= 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_{km6} \cdot l_6 \cdot \frac{U_s}{\sqrt{3}} = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,19 \cdot 10^{-6} \cdot 3 \cdot \frac{22 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} \\ &= 2,2745 A \end{aligned} \quad (5.26)$$

$$\begin{aligned} Q_{c6} &= \sqrt{3} \cdot U_n \cdot i_{c6} = \sqrt{3} \cdot 22 \cdot 10^3 \cdot 2,2745 = 86670,2581 \text{ VAr} \\ &= 86,6702 \text{ kVAr} \end{aligned} \quad (5.27)$$

5.3 Výpočet parametrů transformátorů

Pro výpočet úbytku napětí na transformátoru T_1 nejprve musím spočítat jeho odpor, impedanci a reaktanci. Poté spočítám, jaké výkony transformátorem prochází a z těchto hodnot určím, jak velký činný a jalový proud transformátorem protéká. Pomocí těchto hodnot již mohu určit velikost napěťového úbytku na transformátoru. Odpor transformátoru spočítám podle následujícího vztahu:

$$R_t = \frac{\Delta P_k \cdot U_n^2}{S_n^2}, \quad (5.28)$$

kde R_t je odpor transformátoru, ΔP_k jsou ztráty transformátoru nakrátko, U_n je sdružené napětí a S_n je jmenovitý výkon transformátoru.

Impedanci spočítám podle vztahu:

$$Z_t = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n}, \quad (5.29)$$

kde Z_t je impedance transformátoru, u_k je napětí transformátoru nakrátko, U_n je sdružené napětí a S_n je jmenovitý výkon transformátoru.

Poté mohu dopočítat reaktanci pomocí vztahu:

$$X_t = \sqrt{Z_t^2 - R_t^2}, \quad (5.30)$$

kde X_t je reaktance transformátoru, Z_t je impedance transformátoru a R_t je odpor transformátoru.

Nyní do vztahů dosadím a spočtu parametry obou transformátorů.

Výpočet parametrů pro transformátor T_1 :

$$R_{t1} = \frac{\Delta P_{k1} \cdot U_n^2}{S_{n1}^2} = \frac{81 \cdot 10^3 \cdot (22 \cdot 10^3)^2}{(25 \cdot 10^6)^2} = 0,0627 \Omega \quad (5.31)$$

$$Z_{t1} = \frac{u_{k1}}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_{n1}} = \frac{11}{100} \cdot \frac{(22 \cdot 10^3)^2}{25 \cdot 10^6} = 2,1296 \Omega \quad (5.32)$$

$$X_{t1} = \sqrt{Z_{t1}^2 - R_{t1}^2} = \sqrt{2,1296^2 - 0,0627^2} = 2,1287 \Omega \quad (5.33)$$

Výpočet parametrů pro transformátor T_2 :

$$R_{t2} = \frac{\Delta P_{k2} \cdot U_n^2}{S_{n2}^2} = \frac{6500 \cdot (22 \cdot 10^3)^2}{(630 \cdot 10^3)^2} = 7,9264 \Omega \quad (5.34)$$

$$Z_{t2} = \frac{u_{k2}}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_{n2}} = \frac{4}{100} \cdot \frac{(22 \cdot 10^3)^2}{630 \cdot 10^3} = 30,7302 \Omega \quad (5.35)$$

$$X_{t2} = \sqrt{Z_{t2}^2 - R_{t2}^2} = \sqrt{30,7302^2 - 7,9264^2} = 29,6903 \Omega \quad (5.36)$$

Nyní spočtu proudy, které transformátorem protékají pomocí výkonů, které transformátor T_1 přenáší. Činný výkon procházející transformátorem spočtu pomocí vztahu:

$$P_{t1} = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 - P, \quad (5.37)$$

kde P_{t1} je činný výkon procházející transformátorem, P_1 je činný výkon odebíraný v místě odběru 1, P_2 je činný výkon odebíraný v místě odběru 2, P_3 je činný výkon odebíraný v místě odběru 3, P_4 je činný výkon odebíraný v místě odběru 4 a P je činný výkon dodávaný do sítě fotovoltaickou elektrárnou.

Dodávané výkony elektrárnou se budou v průběhu dne a noci měnit. Vzorové výpočty uvádím pro činný výkon 1,5 MW a jalový výkon 0,8 MVA. Činný výkon procházející transformátorem pro maximální dodávaný činný výkon fotovoltaickou elektrárnou:

$$\begin{aligned} P_{t1} &= P_1 + P_2 + P_3 + P_4 - P = 12 + 0,2 + 0,2 + 0,2 - 1,5 = \\ &= 11,1 \text{ MW} \end{aligned} \quad (5.38)$$

Jalový výkon procházející transformátorem spočtu pomocí vztahu:

$$Q_{t1} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q - Q_{c1} - Q_{c2} - Q_{c3}, \quad (5.39)$$

kde Q_{t1} je jalový výkon procházející transformátorem, Q_1 je jalový výkon odebíraný v místě odběru 1, Q_2 je jalový výkon odebíraný v místě odběru 2, Q_3 je jalový výkon odebíraný v místě odběru 3, Q_4 je jalový výkon odebíraný v místě odběru 4, Q je jalový výkon odebíraný ze sítě fotovoltaickou elektrárnou, Q_{c1} je nabíjecí výkon kabelu V_1 , Q_{c2} je nabíjecí výkon kabelu V_2 a Q_{c3} je nabíjecí výkon kabelu V_3 .

Vztahy zapisuji tak, že se fotovoltaická elektrárna chová jako odběr jalového výkonu s induktivním účinníkem, proto na rozdíl od výpočtu činného výkonu je její jalový výkon se znaménkem plus. Odběry se také chovají jako induktivní zátěž, proto je k celkovému procházejícímu výkonu transformátorem přičítám, ale nabíjecí výkony kabelů jsou již kapacitní zátěž, proto jsou od výsledného výkonu odečteny. S nabíjecími výkony kabelů V_4 , V_5 a V_5 nemusím počítat, protože tyto proudy budou vykompenzované a fotovoltaická elektrárna řídí výkon na jejím výstupu, kde dochází k měření provozovatelem distribuční

soustavy. Odebíraný výkon elektrárny se opět bude měnit, proto zatím budu pro vzorový výpočet uvažovat maximální jalovou zátěž fotovoltaické elektrárny. Jalový výkon procházející transformátorem při maximálním odběru jalového výkonu fotovoltaickou elektrárnou:

$$\begin{aligned} Q_{t1} &= Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q - Q_{c1} - Q_{c2} - Q_{c3} = \\ &= 4 + 0,1 + 0,1 + 0,1 + 0,8 - 0,1748 - 0,1049 - 0,1049 = \quad (5.40) \\ &= 4,7153 \text{ MVar} \end{aligned}$$

Pomocí těchto hodnot již mohu spočítat, jaké proudy transformátorem protékají. Pro výpočet činného proudu protékajícího transformátorem využiji vztah:

$$I_{t\check{c}} = \frac{P_t}{\sqrt{3} \cdot U_n}, \quad (5.41)$$

kde $I_{t\check{c}}$ je činný proud protékající transformátorem, P_t je činný výkon přenášený transformátorem a U_n je sdružené napětí.

A pro výpočet jalového proudu protékajícího transformátorem využiji vztah:

$$I_j = \frac{Q_t}{\sqrt{3} \cdot U_n}, \quad (5.42)$$

kde I_{tj} je jalový proud protékající transformátorem, Q_t je jalový výkon přenášený transformátorem a U_n je sdružené napětí.

Nyní do vztahů dosadím:

$$I_{t1\check{c}} = \frac{P_{t1}}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{11,1 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 22 \cdot 10^3} = 291,2995 \text{ A} \quad (5.43)$$

$$I_{t1j} = \frac{Q_{t1}}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{4,7153 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 22 \cdot 10^3} = 123,7447 \text{ A} \quad (5.44)$$

Tyto hodnoty později použiji pro vypočítání úbytku napětí na transformátoru.

5.4 Výpočet výkonů a proudů na vedení

Nyní spočítám, jaké výkony jsou přenášeny jednotlivými vedeními a z těchto hodnot zjistím, jaký proud vedeními protéká. Díky tomuto proudu poté mohu vypočítat úbytky napětí na vedeních a také, jaké ztráty na vedeních vznikají.

Velikosti výkonů spočítám pomocí prvního Kirchhoffova zákona, který říká, že algebraický součet proudů v uzlu je roven nule. Tento zákon lze také aplikovat na elektrické výkony,

protože jsou na velikosti proudu závislé. Směry proudů a výkonů uvažují od transformátoru T₁ doprava dle schématu na obr. 5-1. Pokud proudy a výkony vyjdou záporné, znamená to, že pro tento případ je směr toku energie obrácený.

Výpočet činného a jalového výkonu přeneseného vedením V₁:

$$P_{v1} = P_{t1} - P_1 = 11,1 - 12 = -0,9 \text{ MW} \quad (5.45)$$

$$Q_{v1} = Q_{t1} - Q_1 = 4,7153 - 4 = 0,7153 \text{ MVar} \quad (5.46)$$

Výpočet činného a jalového výkonu přeneseného vedením V₂:

$$P_{v2} = P_{v1} - P_2 = -0,9 - 0,2 = -1,1 \text{ MW} \quad (5.47)$$

$$Q_{v2} = Q_{v1} - Q_2 + Q_{c1} = 0,7153 - 0,1 + 0,1749 = 0,7902 \text{ MVar} \quad (5.48)$$

Výpočet činného a jalového výkonu přeneseného vedením V₃:

$$P_{v3} = P_{v2} - P_3 + P = -1,1 - 0,2 + 1,5 = 0,2 \text{ MW} \quad (5.49)$$

$$Q_{v3} = Q_{v2} - Q_2 + Q_{c2} = 0,7902 - 0,1 + 0,1749 = -0,0049 \text{ MVar} \quad (5.50)$$

Výsledky výkonových poměrů na vedení V₃ mohou použít jako kontrolu, protože činný výkon P_{V3} přenášený vedením V₃ je roven odběru P₄ a jalový výkon Q_{V3} po přičtení nabíjecího výkonu kabelu Q_{c3} je také roven odběru Q₄. Výkonové poměry na vedeních tedy vycházejí správně a nyní spočítám protékající proudy vedeními dle vztahů 5.41 a 5.42.

Výpočet činného a jalového proudu pro vedení V₁:

$$I_{v1č} = \frac{P_{v1}}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{-0,9 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 22 \cdot 10^3} = -23,6189 \text{ A} \quad (5.51)$$

$$I_{v1j} = \frac{Q_{v1}}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{0,7153 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 22 \cdot 10^3} = 18,7719 \text{ A} \quad (5.52)$$

Výpočet činného a jalového proudu pro vedení V₂:

$$I_{v2\check{c}} = \frac{P_{v2}}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{-1,1 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 22 \cdot 10^3} = -28,8675 \text{ A} \quad (5.51)$$

$$I_{v2j} = \frac{Q_{v2}}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{0,7902 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 22 \cdot 10^3} = 20,7365 \text{ A} \quad (5.52)$$

Výpočet činného a jalového proudu pro vedení V₃:

$$I_{v3\check{c}} = \frac{P_{v3}}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{0,2 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 22 \cdot 10^3} = 5,2486 \text{ A} \quad (5.51)$$

$$I_{v3j} = \frac{Q_{v3}}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{-0,0049 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 22 \cdot 10^3} = -0,1290 \text{ A} \quad (5.52)$$

Z těchto hodnot již mohou spočítat úbytky napětí v jednotlivých uzlech sítě.

5.5 Výpočet úbytků napětí

Pro výpočet úbytku napětí na vedeních a na transformátoru použijí vztah 4.1, který upravím pro výpočet úbytku sdruženého napětí:

$$\Delta U_s = \sqrt{3} \cdot (R \cdot I_{\check{c}} + X \cdot I_j), \quad (5.53)$$

kde ΔU_s je úbytek sdruženého napětí, R je činný odpor prvku, $I_{\check{c}}$ je činný proud protékající prvkem, X je reaktance prvku a I_j je jalový proud protékající prvkem.

Nyní do vztahu dosadím a spočtu úbytky na jednotlivých prvcích v síti. Pokud úbytek napětí z důvodu směru toku výkonu vyjde záporný, znamená to, že napětí je v tomto bodě v síti vyšší než jmenovitá hodnota. Výpočet úbytku sdruženého napětí na transformátoru T₁:

$$\begin{aligned} \Delta U_{st1} &= \sqrt{3} \cdot (R_{t1} \cdot I_{t1\check{c}} + X_{t1} \cdot I_{t1j}) = \\ &= \sqrt{3} \cdot (0,0627 \cdot 291,2995 + 2,1286 \cdot 123,7447) = 487,8919 \text{ V} \end{aligned} \quad (5.54)$$

Výpočet úbytku sdruženého napětí na vedení V₁:

$$\begin{aligned} \Delta U_{sv1} &= \sqrt{3} \cdot (R_{v1} \cdot I_{v1\check{c}} + X_{v1} \cdot I_{v1j}) = \\ &= \sqrt{3} \cdot (1,265 \cdot (-23,6189) + 1,0053 \cdot 18,7719) = -19,0635 \text{ V} \end{aligned} \quad (5.55)$$

Výpočet úbytku sdruženého napětí na vedení V_2 :

$$\begin{aligned}\Delta U_{sv2} &= \sqrt{3} \cdot (R_{v2} \cdot I_{v2\check{c}} + X_{v2} \cdot I_{v2j}) = \\ &= \sqrt{3} \cdot (0,759 \cdot (-28,8675) + 0,6032 \cdot 20,7365) = -16,2856 \text{ V}\end{aligned}\quad (5.56)$$

Výpočet úbytku sdruženého napětí na vedení V_3 :

$$\begin{aligned}\Delta U_{sv3} &= \sqrt{3} \cdot (R_{v3} \cdot I_{v3\check{c}} + X_{v3} \cdot I_{v3j}) = \\ &= \sqrt{3} \cdot (0,759 \cdot 5,2486 + 0,6032 \cdot (-0,1290)) = 6,765198168 \text{ V}\end{aligned}\quad (5.57)$$

Z hodnot úbytků napětí spočítám velikosti napětí v jednotlivých uzlech sítě.

5.6 Výpočet napět'ových poměrů

Budu uvažovat, že transformátor je nastaven na odbočku, kdy je jeho výstupní sdružené napětí 22 kV. Od této hodnoty budu následovně odečítat úbytky sdruženého napětí a tím vypočítám velikosti napětí v uzlech sítě. Napětí budu popisovat pomocí indexů od A do D, které označují jednotlivé body v síti, jak je zakresleno ve schématu na obr. 5-1.

$$U_A = U_{t1} - \Delta U_{st1} = 22\,000 - 487,8919 = 21\,512,1081 \text{ V} \quad (5.58)$$

$$U_B = U_A - \Delta U_{sv1} = 21\,512,1081 - (-19,0635) = 21\,531,1716 \text{ V} \quad (5.59)$$

$$U_C = U_B - \Delta U_{sv2} = 21\,531,1716 - (-16,2856) = 21\,547,4572 \text{ V} \quad (5.60)$$

$$U_D = U_C - \Delta U_{sv3} = 21\,547,4572 - 6,765198168 = 21\,540,6920 \text{ V} \quad (5.61)$$

5.7 Výpočet výkonových ztrát na vedení

V následující části provedu výpočet ztrát na jednotlivých částech vedení. Pro výpočet použiji vztah:

$$\Delta P = R_v \cdot I^2, \quad (5.62)$$

kde ΔP je ztrátový výkon, R_v je činný odpor vedení a I je efektivní hodnota proudu.

Pro dosažení do vztahu je nutné znát efektivní hodnotu proudu protékající vedením, pro výpočet této hodnoty použiji vztah:

$$I = \sqrt{I_{\check{c}}^2 + I_j^2}, \quad (5.63)$$

kde I je efektivní hodnota proudu, $I_{\check{c}}$ je činný proud protékající vedením a I_j je jalový proud protékající vedením.

Nyní do vztahů dosadím a vypočítám hodnoty efektivních hodnot proudů protékajících vedeními a činné ztráty, které na vedeních vznikají. Výpočet efektivní hodnoty proudu a ztrát na vedení V_1 :

$$I_{v1} = \sqrt{I_{v1c}^2 + I_{v1j}^2} = \sqrt{(-23,6189)^2 + 18,7719^2} = 30,1701 \text{ A} \quad (5.64)$$

$$\Delta P_{v1} = R_{v1} \cdot I_{v1}^2 = 1,265 \cdot 30,1701^2 = 1151,4482 \text{ W} \quad (5.65)$$

Výpočet efektivní hodnoty proudu a ztrát na vedení V_2 :

$$I_{v2} = \sqrt{I_{v2c}^2 + I_{v2j}^2} = \sqrt{(-28,8675)^2 + 20,7365^2} = 35,5434 \text{ A} \quad (5.66)$$

$$\Delta P_{v2} = R_{v2} \cdot I_{v2}^2 = 0,759 \cdot 35,5434^2 = 958,8718 \text{ W} \quad (5.67)$$

Výpočet efektivní hodnoty proudu a ztrát na vedení V_3 :

$$I_{v3} = \sqrt{I_{v3c}^2 + I_{v3j}^2} = \sqrt{5,2486^2 + (-0,1290)^2} = 5,2502 \text{ A} \quad (5.68)$$

$$\Delta P_{v3} = R_{v3} \cdot I_{v3}^2 = 0,759 \cdot 5,2502^2 = 20,9217 \text{ W} \quad (5.69)$$

5.8 Výpočet jalového výkonu elektrárny

V následující části práce budu pracovat s měnícím se činným a jalovým výkonem fotovoltaické elektrárny. Budu uvažovat, že fotovoltaická elektrárna využívá výkonové střídače firmy Huawei. K jejím produktům mi pan konzultant poskytl technické specifikace, ze kterých vyplývá, že střídač může pracovat s účinnkem minimálně 0,8. Z výkonového trojúhelníku lze odvodit vztah:

$$Q = P \cdot \operatorname{tg}(\arccos(\cos\varphi)), \quad (5.70)$$

kde Q je jalový výkon, P je činný výkon a $\cos\varphi$ je účinník.

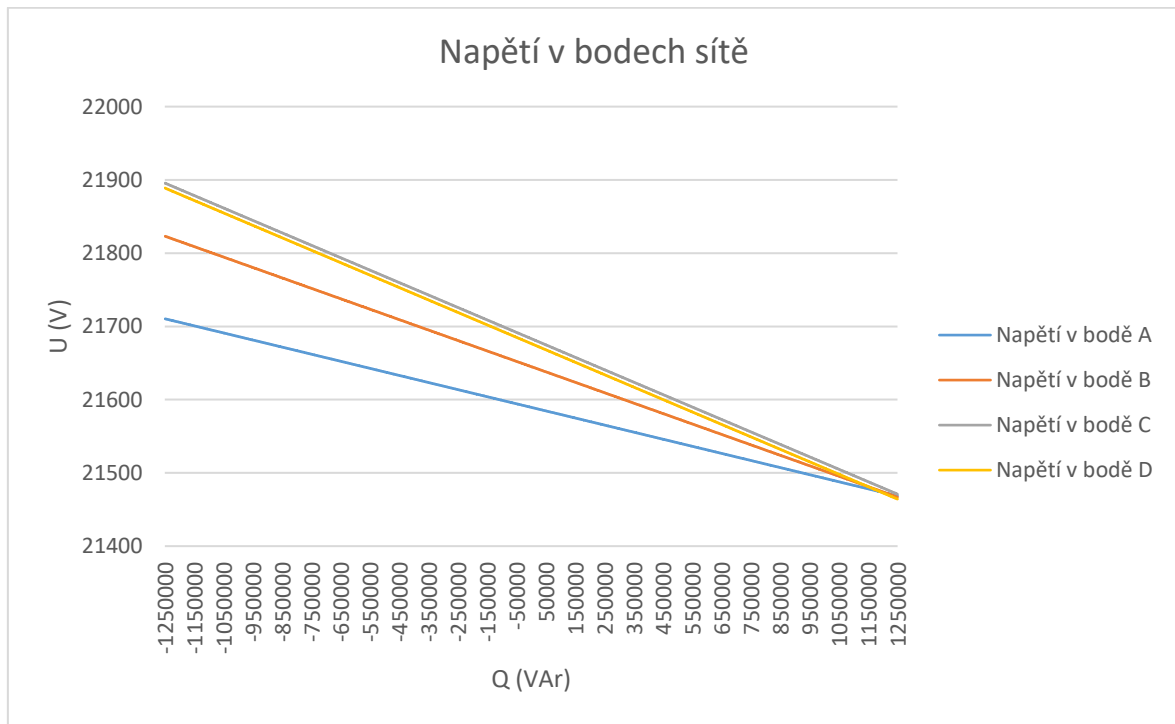
Nyní do vztahu dosadím a vypočítám maximální jalový výkon, který je elektrárna schopna vyrábět při maximálním činném výkonu:

$$Q = P \cdot \operatorname{tg}(\arccos(\cos\varphi)) = 1,5 \cdot \operatorname{tg}(\arccos(0,8)) = 1,125 \text{ MVar} \quad (5.71)$$

5.9 Vliv zdroje na distribuční síť

V následující části práce využiji vztahy, které jsem popsal a pomocí makra v programu Excel, budu spojitě měnit parametry výkonu fotovoltaické elektrárny, čímž budu simulovat její chování na síti a její vliv, který má na distribuční síť při různých výkonech. Parametr, který budu sledovat, je napětí v jednotlivých bodech sítě, kde jsou připojeni odběratelé. Jak

jsem již popsal v teoretické části, na napětí má velký vliv jalový výkon. Dále budu sledovat, jak se mění ztráty na vedení v závislosti na měnícím se výkonu elektrárny.

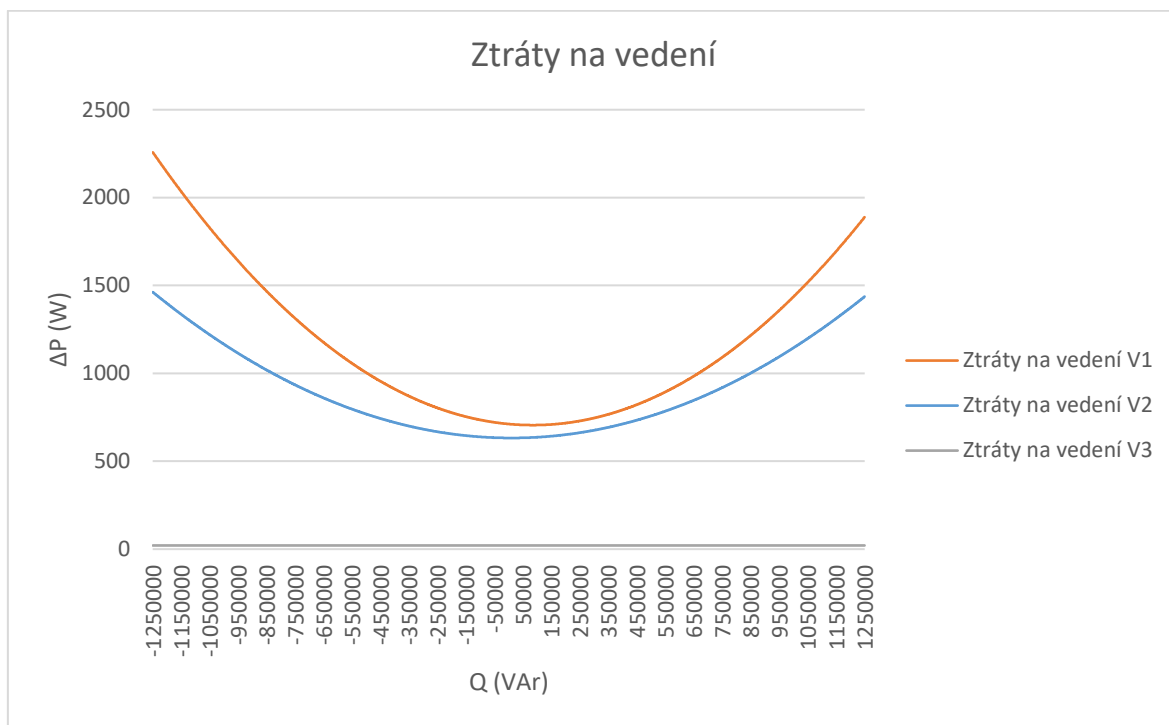


Obr. 5-2 Napěťové poměry v síti při proměnném jalovém výkonu fotovoltaické elektrárny

Z obrázku 5-2 je patrné, že největší vliv má elektrárna z hlediska napětí na bod C. Je to z toho důvodu, že bod C se nachází přímo v místě výroby fotovoltaické elektrárny, to odpovídá teoretickému předpokladu, že největší vliv na síť má vnořený zdroj v místě jeho připojení. Záporné hodnoty jalového výkonu odpovídají dodávce induktivního výkonu do sítě jalovou elektrárnou, z tohoto důvodu je v tuto chvíli napětí v jednotlivých bodech distribuční sítě nejvyšší. Kladné hodnoty odpovídají provozu elektrárny při spotřebě induktivního výkonu, což je nežádoucí, a elektrárna by tím napěťové poměry zhoršovala. V tomto provozu bychom elektrárnu provozovali pouze v případě, že by byla síť zatížená odběrem kapacitního jalového výkonu, čímž by mohlo docházet ke zvýšení napětí na síti nad dovolenou hodnotu.

Rozdíl v hodnotách napětí při maximálním dodávaném induktivním výkonu a maximálním dodávaném kapacitním výkonu v bodě C je 425 V. Pokud by se v síti elektrárna nenacházela, napětí v bodě C by bylo 21541 V. Elektrárna toto napětí může při maximálním dodávaném

kapacitním výkonu zvýšit až na hodnotu 21896 V. Nejmenší vliv má elektrárna na napětí v bodě A, kde je rozdíl mezi minimální a maximální hodnotou napětí 242 V.



Obr. 5-3 Ztráty na vedeních při proměnném jalovém výkonu fotovoltaické elektrárny

Na obrázku 5-3 můžeme pozorovat dva důležité poznatky. Vnořená elektrárna nemá vliv na ztráty na vedení V3 a nejnižší ztráty na vedeních vznikají, když fotovoltaická elektrárna odebírá induktivní jalový výkon 10 kVAr pro vedení V2 a při hodnotě 85 kVAr pro vedení V3. Ztráty na vedení V3 se nemění, protože se elektrárna nachází před tímto vedením a výkony, které vedením protékají, závisí pouze na odběru.

Pomocí řízení účinníku fotovoltaické elektrárny je tedy možné řídit jak napětí v jednotlivých bodech sítě, tak omezit ztráty, které na vedeních vznikají, a tím zvýšit ekonomičnost provozu distribuční sítě. Situace, kterou jsem popsal, je pouze pro konstantní hodnoty odběru a konstantní hodnotu dodávaného činného výkonu fotovoltaické elektrárny. Situace se ale během dne bude měnit. Z tohoto důvodu by pro optimální řízení fotovoltaické elektrárny bylo nutné měřit napětí a výkonové poměry na vedení a z těchto hodnot zjišťovat, pro jaký účinník je provoz nejlepší z hlediska aktuálně vyráběného výkonu elektrárnou. Výkon elektrárny se totiž během dne také mění v závislosti na oblačnosti, zastínění a úhlu paprsků, které na fotovoltaické panely dopadají.

5.10 Návrh dekompenzačního výkonu

Jak jsem již popsal v kapitole 4.6, kabel připojený do sítě se chová jako kondenzátor. Pokud bychom elektrárnu provozovali bez dekompenzační tlumivky, znamenalo by to, že pokud by byla noc a elektrárna nevyráběla elektrickou energii, zatěžovali bychom síť odběrem kapacitního jalového výkonu. To lze vyřešit odpojováním elektrárny od sítě. Toto řešení ale vytváří další problémy, protože bychom tím často používali výkonové vypínače, které se tím opotřebovávají. Také mi pan konzultant vysvětlil, že při častém odpojování a připojování výkonových transformátorů dochází k jejich degradaci a firma, u které by si provozovatel elektrárny transformátor kupoval, by mu mohla nabídnout pouze zkrácenou záruku. Dále pokud by byla například zatažená obloha a elektrárna sice výkon vyráběla, ale nedostatečné množství k dekompenzaci, museli bychom elektrárnu od sítě také odpojit a za tento vyrobený výkon by výrobce elektrické energie nedostal zapláceno, čímž by se snižovaly jeho celkové zisky. Z toho důvodu je vhodné použít dekompenzační tlumivky, které kapacitní výkon kabelů vykompenzují a elektrárnu nebude nutné odpojovat.

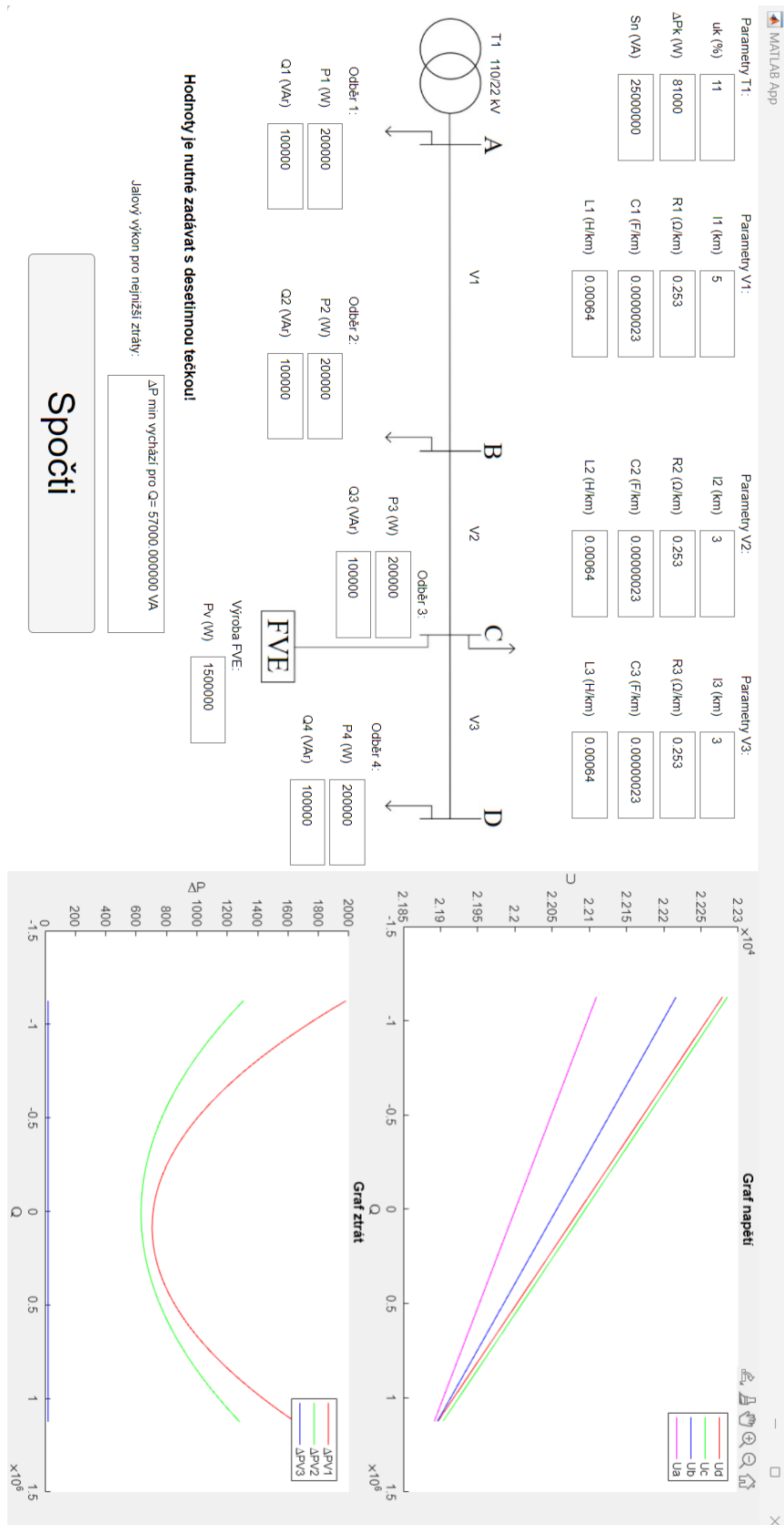
V kapitole 5.2 jsem již spočítal nabíjecí výkony pro kabely, které se nachází na území elektrárny. Tyto kabely jsou před předávacím bodem do distribuční soustavy, takže je nutné je vykompenzovat. Vedení V_4 vykazovalo nabíjecí kapacitní výkon $Q_{c4} = 28,8901 \text{ kVAr}$, vedení V_5 výkon $Q_{c5} = 43,3351 \text{ kVAr}$ a vedení V_6 výkon $Q_{c6} = 86,6702 \text{ kVAr}$. Bylo by možné všechny tři výkony sečíst a navrhnout jednu dekompenzační tlumivku, ale to by bylo nevhodné, protože dekompenzační tlumivka na vyšším napětí je dražší, z toho důvodu se umísťuje před transformátor na hladinu 400 V. Pokud bychom umístili tlumivku pouze na jednu větev, například na vedení V_6 , mohlo by se stát, že zrovna tuto větev musíme odpojit kvůli poruše nebo údržbě a poté bychom nemohli provozovat zbylé dvě větve samostatně. Proto navrhnu tlumivku na každou část vedení zvlášť. V katalogu firmy KBG Energy jsem našel řadu tlumivek pro napěťovou hladinu 400 V i s uvedenými cenami, které následně použiji pro ekonomické zhodnocení elektrárny. Pro vedení V_4 postačí tlumivka s dekompenzačním výkonem 30 kVAr, pro vedení V_5 poté tlumivka s dekompenzačním výkonem 50 kVAr a pro vedení V_6 je nutné použít dvě tlumivky, jednu s kompenzačním výkonem 60 kVAr a druhou s výkonem 30 kVAr. Tímto budou nabíjecí výkony kabelů vykompenzovány a elektrárna se bude chovat jako malá induktivní zátěž. [23]

5.11 Vytvoření uživatelské aplikace

Vytvořená simulace v programu Excel není přehledná pro používání jinými uživateli. Z tohoto důvodu jsem se rozhodl vytvořit aplikaci v programu MATLAB, která přehledněji uzpůsobí vkládání dat a zobrazení výsledků. Aplikaci je možné najít v přílohách této diplomové práce.

Pro spuštění aplikace je nutné nainstalovat si program MATLAB Runtime verzi R2023a (9.14), která je volně přístupná, takže není nutné mít zakoupený balíček programů MATLAB. Po instalaci stačí spustit program MyAppInstaller_web z přílohy, který uživatele provede instalací aplikace. Poté stačí otevřít složku PVEprogram, poté složku application a v ní se nachází aplikace PVEprogram. Po otevření se uživateli spustí okno, které jsem uvedl na obrázku 5-4, ve kterém jsem již vyplnil údaje ze zadání mé diplomové práce. Jednotlivé buňky je možné libovolně přepisovat a tím pozorovat, jak se mění chování distribuční sítě při změnách parametrů zapojení. V aplikaci je nutné používat desetinnou tečku.

Po vyplnění parametrů a stisknutí tlačítka „Spočti“ aplikace na pravé straně vykreslí graf napětí v jednotlivých bodech sítě a také graf ztrát na vedeních v závislosti na dodávaném jalovém výkonu elektrárnou. Také vypočítá, jaký jalový výkon by měla elektrárna do sítě dodávat, aby byly ztráty na vedeních co nejnižší.



Obr. 5-4 Aplikace v programu MATLAB

6 Zhodnocení výsledků a ekonomických aspektů

Z výsledků případové studie je patrné, že fotovoltaická elektrárna distribuční síť může ovlivňovat jak z hlediska ztrát, tak z hlediska velikosti napětí. Napětí dokáže elektrárna měnit nejvíc v místě jejího připojení, přičemž tato schopnost se vzdáleností od místa připojení elektrárny klesá. Vhodným řízením jalového výkonu je tedy možné toto napětí měnit tak, aby bylo v mezích provozování soustavy pro určitou napěťovou hladinu. Tento jev by byl nejvíce viditelný, pokud by se elektrárna nacházela na konci dlouhého vedení, na kterém by také byla připojena větší zátěž. Tím by při přenosu vznikal velký úbytek napětí, ale pokud by byla elektrárna v tomto bodě připojená, tento jev by omezila.

V případové studii, kterou jsem popisoval, se nejvyšší odběr nachází přímo za transformátorem distribuční sítě. To je pro připojení vnořené elektrárny nevhodný stav, protože výkony a proudy, které následně vedením tečou, jsou již malé a při maximálním vyráběném výkonu elektrárna dodává elektrickou energii až do místa k transformátoru. Pokud by byly kabely navrženy pouze na nízké odběry, mohlo by se stát, že by provozovatel distribuční soustavy takovou elektrárnu nechtěl připojit, protože by se tím kabely mohly přetěžovat. Další problém je, že výkony, které by byly vedeními přenášeny v případě, že by se zde elektrárna nenacházela, by byly nižší, než pokud by elektrárna vyráběla maximální výkon. Z toho vyplývá, že by se připojením elektrárny do sítě zvýšily ztráty na kabelech a tím i jejich oteplování. Tato situace ale nastává pouze v případě, kdy je největší odběr výkonu připojený v distribuční síti mezi fotovoltaickou elektrárnou a transformátorem distribuční soustavy. Pokud by byl tento odběr v místě připojení elektrárny nebo za ní, v případě mé studie vpravo, tak by elektrárna měla pozitivní vliv i z hlediska ztrát vznikajících na vedení.

Další z negativních vlivů na síť, které fotovoltaické elektrárny mají, je nadměrná výroba elektrické energie. To se může stát, pokud je celkový instalovaný výkon fotovoltaických elektráren vysoký a je plně využitý díky dobrému počasí. Tuto situaci může také zhoršit to, že je zrovna den v týdnu, kdy je odběr elektrické energie snížený, například o víkend nebo státním svátku. Tato situace nastala například během Velikonočního pondělí 10. dubna 2023. V tento den svítilo slunce a elektrárny vyráběly maximální výkon. Také bylo pracovní volno, což zapříčinilo minimální spotřebu. Navíc nebylo možné přebytečnou elektrickou energii vyvézt do zahraničí, protože ostatní země v Evropě také Velikonoce slaví a byly rovněž

přebytkové. Chyba byla i na straně obchodníků, kteří provedli nesprávnou predikci vyrobené energie fotovoltaickými elektrárnami a také nesprávně odhadli spotřebu. Společnost ČEPS tedy aktivovala omezovací plán a odpojila fotovoltaické elektrárny o celkovém výkonu 400 MW. ČEPS bude muset provozovatelům odpojených elektráren vyplatit náhradu, která celkově vyšplhá do řádů milionů korun. Tuto částku si pak nechá proplatit od regulačního úřadu v rámci pravidel regulace. [24]

6.1 Zhodnocení ekonomických aspektů

V této části práce odhadnu cenu fotovoltaické elektrárny, která bude splňovat nutné technické parametry. Při návrhu elektrárny je důležité si promyslet, kde se bude nacházet, protože na výrobu elektrické energie a z toho vyplývající výnos má vliv několik aspektů. Například pokud bychom navrhli postavit elektrárnu v místě, kde je častá oblačnost, tak by elektrárna vyráběla méně než v oblastech, kde je častěji jasno. Také je důležité myslet na administrativní aspekty stavby. Pozemek musí splňovat požadavky na stavbu fotovoltaické elektrárny v rámci územního plánu, také je nutné zajistit stavební povolení a další náležitosti. Zároveň je nutné myslet na připojení do distribuční sítě, takže je výhodné navrhnout místo, které je v blízkosti již existujícího vedení. Provozovatel distribuční sítě navíc nemusí připojení povolit, pokud by v síti pro výkon elektrárny nebyla kapacita. Nutné je vybrat pozemek, který je pro stavbu fotovoltaické elektrárny vhodný z hlediska terénu a jeho okolí. Nejvhodnější jsou rovné pozemky, kolem kterých se nenachází objekty, které by panely zastíňovaly. Účinnost výroby ovlivňuje i celkové znečištění vzduchu.

S umístěním elektrárny pomáhá mapa globálního záření, která vychází z dlouhodobých meteorologických měření a uvedl jsem ji na obr. 6.1. Z této mapy vyplývá, že je v České republice nejvýhodnější umístit fotovoltaickou elektrárnu na jihovýchodě republiky. Bohužel je v těchto místech často výhodné využívat pozemek k zemědělským účelům. Průměrná cena zemědělského pozemku se v této oblasti pohybuje kolem 50 Kč/m². Tato cena se ale může měnit a skutečnou cenu lze získat pouze při prezentaci nabídky prodávajícím. Pro účely fotovoltaického parku je výhodné koupit pozemky, které jsou dlouhodobě zemědělsky nevyužívané, protože mají nižší cenu. [25]



Obr. 6-1 Mapa globálního záření ČR [26]

Dále je nutné zjistit, jak velký pozemek bude pro stavbu fotovoltaické elektrárny potřeba. Pro zjištění této informace musíme určit, jakou technologii uchycení panelů použijeme a jaký bude jejich sklon. Z toho poté určíme odstup panelů, aby se vzájemně nezastiňovaly. Toto je velice důležitá část návrhu, protože účinnost elektrárny je závislá na použité technologii panelů, jejich náklonu a rozestupu. Pro nejvyšší možné množství vyrobené elektrické energie se v ČR doporučuje použít orientaci panelu na jih se sklonem 35°. [27]

Na pozemku se také budou nacházet měnírny, oplocení a další technické prostředky zajišťující funkci elektrárny. Plocha pozemku pro fotovoltaickou elektrárnu se odhaduje mezi 24 až 32 tisíci metry čtverečními na megawatt výkonu. Fotovoltaická elektrárna, kterou navrhují, má výkon 1,5 MW. Pokud bych zakoupil pozemek, který má plochu 40 000 m² s cenou 50 Kč/m², celkově by pozemek stál dva miliony Kč. Nejspíš by také bylo nutné pozemek upravit tak, aby jej bylo možné pro výrobu použít. [28]

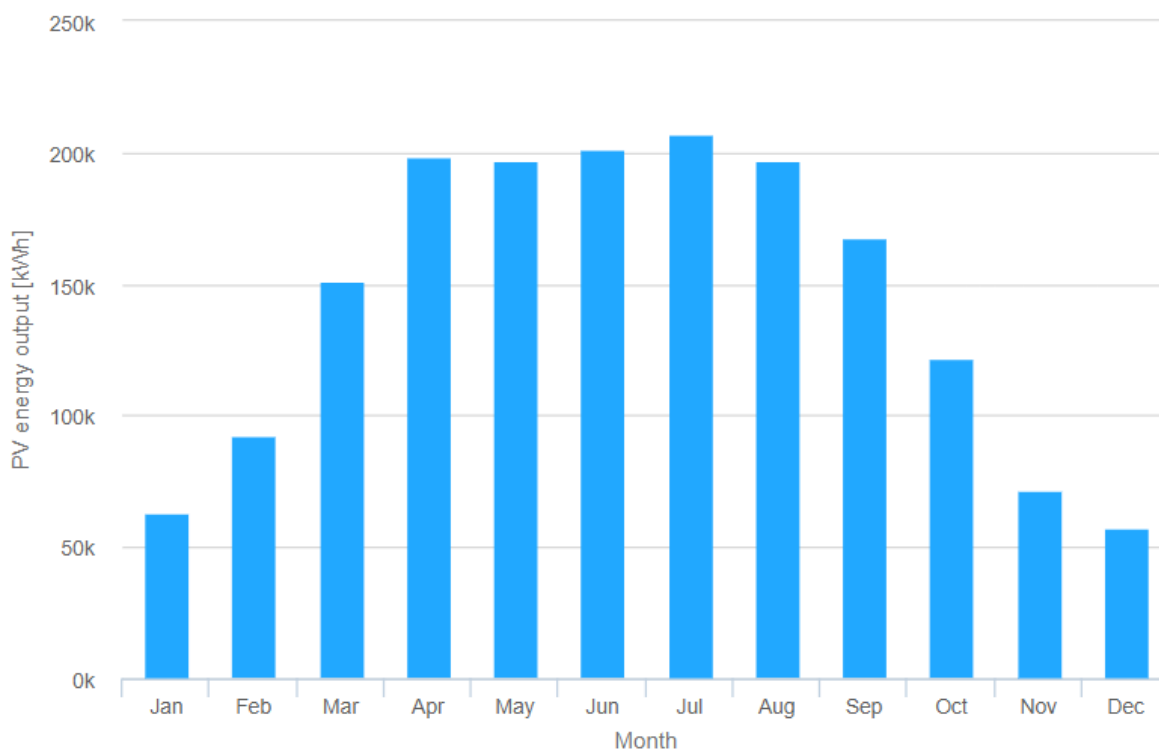
Velkou část nákladů zahrnují přímo fotovoltaické panely a jejich konstrukce. Pokud bychom použili například panely LONGI SOLAR LR4-72HPH-445M, jejich cena se při velkém odběru pohybuje okolo 3500 Kč. Jeden panel má instalovaný výkon 445 W, pro elektrárnu s výkonem 1,5 MW je nutné jich zakoupit 3300 kusů. Panely by tedy stály 11,5 milionu Kč. [29]

Také je třeba zakoupit výkonový měnič, který je pro fotovoltaický systém výhodný. Střídače zajišťují přeměnu stejnosměrného proudu, který fotovoltaická elektrárna vytváří na střídavý a také skenují stav elektrárny pomocí trackerů a spínají ji tak, aby měla nejvyšší účinnost. Navrhl jsem použít solární síťový střídač SUN2000-100KTL – M1. Jeho maximální výkon je 100 kW, proto je nutné jich pro elektrárnu použít 15. Cena tohoto střídače je 190 000 Kč. Celkově by investice do střídačů vyšla na 2,85 milionu Kč. [30]

Další výdaje by zahrnovaly transformátory, trafostanice, kabely, uzemnění, oplocení, nosné lavice pro panely, betonové podstavce, rozvaděče, výkopové práce a tak dále. Odhad ceny podle průměrných cen elektráren vychází na 20 milionů Kč na MW výkonu bez ceny pozemku. Pokud bych tento odhad použil, výstavba elektrárny by celkově stála 30 milionů Kč a s pozemkem 32 milionů Kč. Ceny jednotlivých prvků elektrárny se mění a záleží na konkrétním provedení fotovoltaické elektrárny. [28]

Fotovoltaická elektrárna má také své provozní náklady. Do těchto nákladů spadají nahodilé opravy, výměny poškozených zařízení, zajištění elektrárny bezpečnostní službou. Dále je nutné sekat kolem fotovoltaických panelů trávu, aby je nezastiňovala, popřípadě odklízet z panelů sníh nebo je jinak čistit. Měsíční náklady odhaduji na 20 000 Kč.

Výnos z fotovoltaické elektrárny není kvůli měnícímu se počasí konstantní, ale lze z dlouhodobého hlediska odhadnout. K tomu jsem použil online aplikaci PVGIS, což je model vytvořený výzkumným centrem evropské komise pro odhad výroby fotovoltaické elektrárny. Do tohoto modelu jsem zadal instalovaný výkon 1,5 MW, sklon panelu 35°, orientaci na jih a umístění fotovoltaické elektrárny v oblasti Břeclavi a ztráty systému 14 %. Výsledný graf jsem uvedl na obr. 6.2.



Obr. 6-2 Graf odhadu výroby fotovoltaické elektrárny

Po sečtení jednotlivých sloupců v grafu vyšla celková výroba elektrárny statistickým odhadem aplikace 1 725 MWh za rok. Cena za výkup elektrické energie je také proměnlivá. Budu počítat s tím, že za 1 MWh průměrně získám 2 000 Kč. Při odečtení měsíčních nákladů by fotovoltaický park ročně vydělával 3,2 milionu Kč. Podnikatel bude muset za prodanou elektřinu platit daně, jejich výši jsem určil 15 %. Jeho čistý zisk bude tedy 2,72 milionu Kč ročně.

Návratnost investice do fotovoltaické elektrárny spočítám podle vztahu:

$$T = \frac{N_p}{CF} \quad (6.1)$$

kde T je doba návratnosti, N_p jsou počáteční náklady a CF je cash flow, neboli peněžní tok.

Po dosazení do vztahu:

$$T = \frac{N_p}{CF} = \frac{32}{2,72} = 11,76 \text{ let} \quad (6.2)$$

Investice do fotovoltaické elektrárny by měla návratnost zhruba 12 let, přičemž doba výstavby takového parku lze odhadnout na 5 let. Tedy od počátku projektu začne fotovoltaická elektrárna vydělávat za 17 let. Odhadovaná životnost fotovoltaického parku je 30 a více let. Po zaplacení počáteční investice a postavení elektrárny, by tedy elektrárna

mohla dalších 18 let přinášet provozovateli čistý zisk. Za tuto dobu by teoreticky vydělala 48,96 milionů Kč. Pokud by například investor peníze uložil do akciových fondů s průměrným růstem 8 % ročně, za 30 let by z počátečních 32 milionů Kč měl 50 milionů Kč. Po zdanění zisku 18 milionů Kč by mu zbylo 47 milionů Kč. V obou případech jsem zanedbal inflaci, takže mohu zisky porovnat. V případě fotovoltaické elektrárny by čistý zisk z investice činil 48,96 milionů Kč a v případě investice do akciových fondů 17 milionů Kč.

Závěr

Cílem této práce bylo popsat současnou situaci v elektrizační síti s uvažováním vlivů obnovitelných zdrojů. Během řešení své diplomové práce a problematiky obnovitelných zdrojů jsem došel k výsledkům, které zde popíši.

V České republice dřívější topologie vedly k připojení zdrojů k přenosové síti a odběratelů k distribuční síti, ale nové tendence směřují k připojování velkého množství menších zdrojů k distribuční síti, čímž se může lokálně změnit tok elektrické energie v soustavě. Dalším důležitým faktem, je ten, že instalovaný výkon obnovitelných zdrojů v ČR není zanedbatelný. Sice jejich roční výroba není poměrově tolik významná, ale během příznivých dnů může nastávat situace, kdy bude výroba z těchto zdrojů zastávat velkou část celkové výroby všech elektráren, které jsou do elektrizační soustavy připojené.

Důležitou částí jsou pravidla a zákony, kterými se musí výrobci řídit a dodržovat technické parametry, podmiňující připojení zdroje k distribuční soustavě. Výrobna se musí chovat tak, aby elektrizační soustavu podporovala z hlediska řízení napětí, činného a jalového výkonu a dodržovala zásady pro podporu sítě při stavech odchylky frekvence. Je důležité pochopit, že výrobna se nemůže chovat na síti nezodpovědně, ale musí splňovat požadavky, které jí provozovatel distribuční sítě nařizuje. Pokud by tyto pravidla nebyla, elektrizační soustava by se stala nestabilní a docházelo by k častějším výpadkům dodávky elektrické energie. Představil jsem konkrétní zapojení, kterým by mohla být elektrárna do distribuční sítě připojena.

Úbytek napětí na vedení je závislý na charakteru proudu, který vedením prochází. Z toho vyplývá nejen to, že zátěže připojené k distribuční síti ovlivňují velikost napětí, ale také to, že způsobem provozu výroby je možné hodnotu napětí sítě přímo měnit. V závěru této kapitoly jsem také uvedl, co to je nabíjecí výkon kabelu a jak se spočítá jeho velikost. Obě pasáže této kapitoly jsem následně využil při počítání případové studie v praktické části práce.

Na praktické části práce jsem spolupracoval s mým konzultantem, panem doktorem Žákem. Společně jsme vytvořili zapojení fotovoltaické elektrárny připojené do sítě, na které bude

jasně patrný vliv, kterou obnovitelný zdroj na distribuční síť má. A vytvořil jsem případovou studii tohoto zapojení. Ze zadání jsem získal mezivýsledky, které jsem poté použil k výpočtu napěťových a ztrátových poměrů na síti. Tyto výsledky jsem uvedl též do grafu a popsal. Při uplatnění důležitých myšlenek z teoretické části práce bylo patrné, že elektrárna svým chováním může jak pozitivně, tak negativně ovlivnit ztráty a úbytky napětí na síti, takže je velice důležité určit pravidla pro chování těchto zdrojů.

Výsledky z případové studie jsem popsal a uvedl další věci, kterými mohou obnovitelné zdroje chování sítě ovlivňovat. Důležitou myšlenkou této práce bylo také to, že je složitější určit, jaké výkony je nutné pro elektrárny rezervovat, protože další z parametrů, se kterým je nutné počítat je počasí, které se nedá vždy s jistotou předpovědět. To může vést k přebytkům výkonu na síti a odpojování zdrojů od sítě. Za tato odpojení provozovatel sítě, popřípadě obchodník s elektrickou energií, který špatně odhadl situaci, musí zaplatit pokuty výrobcům, kteří byli odpojeni. Odhadl jsem také, kolik by elektrárna, se kterou jsem počítal mohla stát a také zda by byla investice do této elektrárny rentabilní. Z ekonomického zhodnocení vyšlo, že elektrárna by po 17 letech od zahájení výstavby vydělávala čistý zisk a pokud by její životnost byla 30 let, celkově by majiteli vydělala 48,96 milionů Kč. Při porovnání s investicí do akciových fondů je výstavba fotovoltaické elektrárny výhodnější. Na druhou stranu cena výstavby i výroba elektrické energie a cena za její prodej je velice proměnlivá, a proto jsem uvedl pouze odhady těchto hodnot. Pokud by se investor rozhodoval, zda je investice výnosná, bylo by potřeba vytvořit podrobnější analýzu.

Můj osobní názor na problematiku obnovitelných zdrojů je takový, že je to velmi složitá situace. Obnovitelné zdroje nemohou úplně nahradit konvenční elektrárny, které jsou stabilnější. Na druhou stranu tvorba oxidu uhličitého těchto elektráren není zanedbatelná a prostředky pro snížení globálního oteplování je důležité využít. Na obnovitelné zdroje ale nelze nahlížet jako na způsoby výroby elektrické energie, které by se bez ostatních elektráren obešly, a proto je důležité se do jejich výstavby pouštět s rozvahou, tak aby byla elektrizační síť nadále stabilní.

Literatura

- [1] ČEZ, a. s., 2020. ELEKTRIZAČNÍ A PŘENOSOVÁ SOUSTAVA [online].
[Cit. 6.10.2022]. Dostupné z:
<https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/distribuce-elekriny/distribuce-elektricke-energie-podrobne/elektrizacni-a-prenosova-soustava/vyklad>
- [2] ČEPS, a. s., 2020. ENTSO-E [online]. [Cit. 6.10.2022]. Dostupné z:
<https://www.ceps.cz/cs/entso-e>
- [3] ČEPS, a. s., 2021. Údaje o PS [online]. [Cit. 6.10.2022]. Dostupné z:
<https://www.ceps.cz/cs/udaje-o-ps>
- [4] ČEZ, a. s., 2020. DISTRIBUČNÍ SOUSTAVA [online]. [Cit. 6.10.2022].
Dostupné z:
<https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/distribuce-elekriny/distribuce-elektricke-energie-podrobne/distribucni-soustava/vyklad>
- [5] Topinfo s.r.o., 2023. Jak zjistím, ke které distribuční soustavě elektriny patřím, a mohu si zvolit jinou? [online]. [Cit. 6.10.2022]. Dostupné z:
<https://www.tzb-info.cz/ceny-paliv-a-energie/211-jak-zjistim-ke-ktere-distribucni-soustave-elekriny-patrim-a-mohu-si-zvolit-jinou>
- [6] ČEZ, a. s., 2017. TECHNICKÁ DATA [online]. [Cit. 6.10.2022]. Dostupné z:
<https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/distribuce-elekriny/distribuce-elektricke-energie-podrobne/distribucni-soustava/technicka-data>
- [7] ČEZ, a. s., 2020. TOPOLOGIE DISTRIBUČNÍCH SÍTÍ [online].
[Cit. 18.10.2022]. Dostupné z:
<https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/distribuce-elekriny/distribuce-elektricke-energie-podrobne/topologie-distribucnich-siti/vyklad>
- [8] OTE, a.s., 2022. Statistika POZE [online]. [Cit. 18.10.2022]. Dostupné z:
<https://www.ote-cr.cz/cs/statistika/statistika-poze/registrace>
- [9] David Vobořil, 2016. Vodní elektrárny – princip, rozdělení, elektrárny v ČR [online]. [Cit. 18.10.2022]. Dostupné z:
<https://oenergetice.cz/obnovitelne-zdroje-energie/vodni-elekrany-princip-a-rozdeleni>
- [10] Svaz podnikatelů pro využití energetických zdrojů, z.s., 2023. Aktuality [online].
[Cit. 18.10.2022]. Dostupné z: <https://www.spvez.cz/cs/aktuality/statistika>

- [11] *E.ON Energie, a.s.*, 2022. Jak fungují fotovoltaické elektrárny [online].
[Cit. 18.10.2022]. Dostupné z: <https://www.eon.cz/radce/zelena-energie/solarni-energie/jak-funguji-fotovoltaiicke-elektrarny/>
- [12] *NEA*, 2020. How much electricity do solar panels produce? [online].
[Cit. 18.10.2022]. Dostupné z:
<https://www.nea.org.uk/who-we-are/innovation-technical-evaluation/solarpv/how-much-electricity-solar-produce/>
- [13] *David Vobořil*, 2016. Větrné elektrárny – princip, rozdělení, elektrárny v ČR [online]. [Cit. 18.10.2022]. Dostupné z:
<https://oenergetice.cz/typy-elektraren/vetrne-elektrarny-princip-cinnosti-zakladni-rozdeleni>
- [14] *ČEZ, a. s.*, 2020. BIOMASA A JEJÍ ENERGETICKÝ POTENCIÁL [online].
[Cit. 8.11.2022]. Dostupné z:
<https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/obnovitelne-zdroje-energie/spalovani-biomasy/vyklad>
- [15] *Tomáš Molek*, 2015. Bioplyn a bioplynové stanice v ČR [online].
[Cit. 18.10.2022]. Dostupné z:
<https://oenergetice.cz/elektrina/bioplyn-a-bioplynovne-stanice-v-cr>
- [16] *ČEZ, a. s.*, 2021. PRAVIDLA PROVOZOVÁNÍ DISTRIBUČNÍCH SOUSTAV PŘÍLOHA 4 [online]. [Cit. 8.11.2022]. Dostupné z:
https://www.cezdistribuce.cz/webpublic/file/edee/distribuce/ppds/ppds-2021_priloha-4.pdf
- [17] *Wolters Kluwer*, 2023. ZÁKON 458/2000 Sb. [online]. [Cit. 8.11.2022].
Dostupné z:
<https://www.aspi.cz/products/lawText/1/49962/1/2?rem=p%C5%99ipojov%C3%A1n%C3%AD>
- [18] *Josef Thustý et al.*, 2011. Návrh a rozvoj elektroenergetických sítí [online].
[Cit. 6.12.2022]. Dostupné z:
https://www.mpo-efekt.cz/upload/7799f3fd595eeee1fa66875530f33e8a/cvut-4-navrh_siti.pdf
- [19] *Petr Toman et al.*, 2011. Provoz distribučních soustav [online]. [Cit. 6.12.2022].
Dostupné z:
<https://www.mpo-efekt.cz/upload/7799f3fd595eeee1fa66875530f33e8a/cvut-7-provoz.pdf>

- [20] *EMG Zlín, s.r.o.*, Kompenzace jalové energie [online]. [Cit. 6.12.2022].
Dostupné z:
https://www.emgzlin.cz/menu/kompenzace-o_kompenzacni.html
- [21] *Di-elcom, s.r.o.*, 2009. STELCOM – statický regulátor jalového výkonu [online].
[Cit. 6.12.2022]. Dostupné z:
<http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/39640.pdf>
- [22] *Ostravská univerzita*, Ferrantiho jev-vliv kapacity na přenos, přirozený výkon vedení [online]. [Cit. 6.12.2022]. Dostupné z:
<https://projekty.osu.cz/akreditace2017/Ferrantiho-jev-vliv-kap.-na-p%C5%99enos,%20p%C5%99%C3%ADrozen%C3%BD-v%C3%BDkon-veden%C3%AD.pdf>
- [23] *KBH Energy a.s.*, Dekompenzační tlumivky [online]. [Cit. 25.4.2023].
Dostupné z:
<https://kbh.cz/dekompenzacni-tlumivky>
- [24] *Jana Klímová*, 2023. ČEPS zaplatí miliony korun náhrad za pondělní vypnutí solárů. Elektřinu už nebylo kam poslat [online]. [Cit. 25.4.2023]. Dostupné z:
https://www.irozhlas.cz/ekonomika/ceps-solarni-elektrarny-panely-fotovoltaika-odpojeni-kompenzace_2304131808_til
- [25] *FARMY.CZ*, 2022. JAKÁ JE TRŽNÍ CENA PŮDY VE VAŠÍ LOKALITĚ? [online]. [Cit. 9.5.2023]. Dostupné z:
<https://www.cenova-mapa-pudy.cz/>
- [26] *Tomáš Münster*, Fotovoltaická elektrárna [online]. [Cit. 9.5.2023]. Dostupné z:
<https://www.solarroof.cz/fve.php>
- [27] *Ing. Bronislav Bechník, Ph.D.*, 2014. Optimální orientace a sklon fotovoltaických panelů [online]. [Cit. 9.5.2023]. Dostupné z:
<https://oze.tzb-info.cz/114865-optimalni-orientace-a-sklon-fotovoltaickych-panelu>
- [28] *SolarReviews.*, 2022. What is a solar farm? Costs, land needs & more [online]. [Cit. 25.4.2023]. Dostupné z:
<https://www.solarreviews.com/blog/what-is-a-solar-farm-do-i-need-one>
- [29] *Q – ELEKTRIK a.s.*, 2023. FOTOVOLTAICKÝ PANEL 445W LONGI SOLAR LR4-72HPH-445M STŘÍBRNÝ RÁM [online]. [Cit. 6.12.2022]. Dostupné z:
https://elektro.q-elektrik.cz/fotovoltaiicke-panely/fotovoltaiicky-panel-445w-longi-solar-lr4-72hph-445m-stribrny-ram_p74996

[30] *Solartec s.r.o.*, 2023. Solární síťový střídač SUN2000-100KTL – M1 [online].

[Cit. 25.4.2023]. Dostupné z:

<https://shop.solartec.eu/solarni-sitovy-stridac-sun2000-100ktl-m1/?srsltid=AR57-fCpX8ToRdzXX-y49ThMarkbpzEq3rCzAA7orSNYN1K0AbMYszCOOf4>

Přílohy

Příloha 1: Tabulka hodnot napětí v okolí minima ztrát

Qv (VAr)	Napětí v bodě A (V)	Napětí v bodě B (V)	Napětí v bodě C (V)	Napětí v bodě D (V)
-41000	21593,48161	21650,97532	21690,31904	21683,55385
-40000	21593,38485	21650,83287	21690,14917	21683,38397
-39000	21593,28809	21650,69041	21689,9793	21683,2141
-38000	21593,19133	21650,54796	21689,80943	21683,04423
-37000	21593,09458	21650,40551	21689,63956	21682,87436
-36000	21592,99782	21650,26305	21689,46969	21682,70449
-35000	21592,90106	21650,1206	21689,29982	21682,53462
-34000	21592,8043	21649,97814	21689,12994	21682,36475
-33000	21592,70754	21649,83569	21688,96007	21682,19487
-32000	21592,61079	21649,69324	21688,7902	21682,025
-31000	21592,51403	21649,55078	21688,62033	21681,85513
-30000	21592,41727	21649,40833	21688,45046	21681,68526
-29000	21592,32051	21649,26587	21688,28059	21681,51539
-28000	21592,22375	21649,12342	21688,11072	21681,34552
-27000	21592,127	21648,98097	21687,94084	21681,17565
-26000	21592,03024	21648,83851	21687,77097	21681,00577
-25000	21591,93348	21648,69606	21687,6011	21680,8359
-24000	21591,83672	21648,5536	21687,43123	21680,66603
-23000	21591,73996	21648,41115	21687,26136	21680,49616
-22000	21591,64321	21648,2687	21687,09149	21680,32629
-21000	21591,54645	21648,12624	21686,92162	21680,15642
-20000	21591,44969	21647,98379	21686,75174	21679,98655
-19000	21591,35293	21647,84134	21686,58187	21679,81667
-18000	21591,25617	21647,69888	21686,412	21679,6468
-17000	21591,15942	21647,55643	21686,24213	21679,47693
-16000	21591,06266	21647,41397	21686,07226	21679,30706
-15000	21590,9659	21647,27152	21685,90239	21679,13719
-14000	21590,86914	21647,12907	21685,73252	21678,96732
-13000	21590,77238	21646,98661	21685,56264	21678,79745
-12000	21590,67563	21646,84416	21685,39277	21678,62757
-11000	21590,57887	21646,7017	21685,2229	21678,4577
-10000	21590,48211	21646,55925	21685,05303	21678,28783
-9000	21590,38535	21646,4168	21684,88316	21678,11796
-8000	21590,28859	21646,27434	21684,71329	21677,94809
-7000	21590,19184	21646,13189	21684,54342	21677,77822
-6000	21590,09508	21645,98943	21684,37354	21677,60835
-5000	21589,99832	21645,84698	21684,20367	21677,43847
-4000	21589,90156	21645,70453	21684,0338	21677,2686
-3000	21589,8048	21645,56207	21683,86393	21677,09873
-2000	21589,70805	21645,41962	21683,69406	21676,92886

-1000	21589,61129	21645,27717	21683,52419	21676,75899
0	21589,51453	21645,13471	21683,35432	21676,58912
1000	21589,41777	21644,99226	21683,18444	21676,41925
2000	21589,32101	21644,8498	21683,01457	21676,24937
3000	21589,22426	21644,70735	21682,8447	21676,0795
4000	21589,1275	21644,5649	21682,67483	21675,90963
5000	21589,03074	21644,42244	21682,50496	21675,73976
6000	21588,93398	21644,27999	21682,33509	21675,56989
7000	21588,83722	21644,13753	21682,16522	21675,40002
8000	21588,74047	21643,99508	21681,99534	21675,23015
9000	21588,64371	21643,85263	21681,82547	21675,06027
10000	21588,54695	21643,71017	21681,6556	21674,8904
11000	21588,45019	21643,56772	21681,48573	21674,72053
12000	21588,35343	21643,42526	21681,31586	21674,55066
13000	21588,25668	21643,28281	21681,14599	21674,38079
14000	21588,15992	21643,14036	21680,97612	21674,21092
15000	21588,06316	21642,9979	21680,80624	21674,04105
16000	21587,9664	21642,85545	21680,63637	21673,87117
17000	21587,86964	21642,713	21680,4665	21673,7013
18000	21587,77289	21642,57054	21680,29663	21673,53143
19000	21587,67613	21642,42809	21680,12676	21673,36156
20000	21587,57937	21642,28563	21679,95689	21673,19169
21000	21587,48261	21642,14318	21679,78702	21673,02182
22000	21587,38585	21642,00073	21679,61714	21672,85195
23000	21587,2891	21641,85827	21679,44727	21672,68207
24000	21587,19234	21641,71582	21679,2774	21672,5122
25000	21587,09558	21641,57336	21679,10753	21672,34233
26000	21586,99882	21641,43091	21678,93766	21672,17246
27000	21586,90206	21641,28846	21678,76779	21672,00259
28000	21586,80531	21641,146	21678,59792	21671,83272
29000	21586,70855	21641,00355	21678,42804	21671,66285
30000	21586,61179	21640,86109	21678,25817	21671,49297
31000	21586,51503	21640,71864	21678,0883	21671,3231
32000	21586,41827	21640,57619	21677,91843	21671,15323
33000	21586,32152	21640,43373	21677,74856	21670,98336
34000	21586,22476	21640,29128	21677,57869	21670,81349
35000	21586,128	21640,14883	21677,40881	21670,64362
36000	21586,03124	21640,00637	21677,23894	21670,47375
37000	21585,93448	21639,86392	21677,06907	21670,30387
38000	21585,83773	21639,72146	21676,8992	21670,134
39000	21585,74097	21639,57901	21676,72933	21669,96413
40000	21585,64421	21639,43656	21676,55946	21669,79426
41000	21585,54745	21639,2941	21676,38959	21669,62439
42000	21585,45069	21639,15165	21676,21971	21669,45452
43000	21585,35394	21639,00919	21676,04984	21669,28465

44000	21585,25718	21638,86674	21675,87997	21669,11477
45000	21585,16042	21638,72429	21675,7101	21668,9449
46000	21585,06366	21638,58183	21675,54023	21668,77503
47000	21584,9669	21638,43938	21675,37036	21668,60516
48000	21584,87015	21638,29692	21675,20049	21668,43529
49000	21584,77339	21638,15447	21675,03061	21668,26542
50000	21584,67663	21638,01202	21674,86074	21668,09555
51000	21584,57987	21637,86956	21674,69087	21667,92567
52000	21584,48311	21637,72711	21674,521	21667,7558
53000	21584,38636	21637,58466	21674,35113	21667,58593
54000	21584,2896	21637,4422	21674,18126	21667,41606
55000	21584,19284	21637,29975	21674,01139	21667,24619
56000	21584,09608	21637,15729	21673,84151	21667,07632
57000	21583,99932	21637,01484	21673,67164	21666,90645
58000	21583,90257	21636,87239	21673,50177	21666,73657
59000	21583,80581	21636,72993	21673,3319	21666,5667
60000	21583,70905	21636,58748	21673,16203	21666,39683
61000	21583,61229	21636,44502	21672,99216	21666,22696
62000	21583,51553	21636,30257	21672,82229	21666,05709
63000	21583,41878	21636,16012	21672,65241	21665,88722
64000	21583,32202	21636,01766	21672,48254	21665,71735
65000	21583,22526	21635,87521	21672,31267	21665,54747
66000	21583,1285	21635,73275	21672,1428	21665,3776
67000	21583,03174	21635,5903	21671,97293	21665,20773
68000	21582,93499	21635,44785	21671,80306	21665,03786
69000	21582,83823	21635,30539	21671,63319	21664,86799

Příloha 2: Tabulka hodnot ztrát na vedení v okolí minima ztrát

Qv (VAr)	Ztráty na vedení V1 (W)	Ztráty na vedení V2 (W)	Ztráty na vedení V3 (W)
-41000	719,4461	633,8507	20,9217
-40000	719,2280	633,7981	20,9217
-39000	719,0116	633,7465	20,9217
-38000	718,7970	633,6960	20,9217
-37000	718,5840	633,6465	20,9217
-36000	718,3729	633,5981	20,9217
-35000	718,1634	633,5507	20,9217
-34000	717,9557	633,5043	20,9217
-33000	717,7498	633,4590	20,9217
-32000	717,5456	633,4148	20,9217
-31000	717,3431	633,3716	20,9217
-30000	717,1424	633,3294	20,9217
-29000	716,9434	633,2883	20,9217
-28000	716,7462	633,2482	20,9217
-27000	716,5507	633,2092	20,9217
-26000	716,3570	633,1712	20,9217
-25000	716,1650	633,1343	20,9217
-24000	715,9747	633,0984	20,9217
-23000	715,7862	633,0635	20,9217
-22000	715,5994	633,0297	20,9217
-21000	715,4144	632,9970	20,9217
-20000	715,2311	632,9652	20,9217
-19000	715,0495	632,9346	20,9217
-18000	714,8697	632,9050	20,9217
-17000	714,6917	632,8764	20,9217
-16000	714,5153	632,8488	20,9217
-15000	714,3408	632,8224	20,9217
-14000	714,1679	632,7969	20,9217
-13000	713,9968	632,7725	20,9217
-12000	713,8275	632,7492	20,9217
-11000	713,6599	632,7269	20,9217
-10000	713,4940	632,7056	20,9217
-9000	713,3299	632,6854	20,9217
-8000	713,1675	632,6662	20,9217
-7000	713,0068	632,6481	20,9217
-6000	712,8479	632,6310	20,9217
-5000	712,6908	632,6150	20,9217
-4000	712,5354	632,6000	20,9217
-3000	712,3817	632,5861	20,9217
-2000	712,2298	632,5732	20,9217
-1000	712,0796	632,5613	20,9217
0	711,9311	632,5505	20,9217
1000	711,7844	632,5408	20,9217

2000	711,6395	632,5321	20,9217
3000	711,4963	632,5244	20,9217
4000	711,3548	632,5178	20,9217
5000	711,2150	632,5122	20,9217
6000	711,0771	632,5077	20,9217
7000	710,9408	632,5042	20,9217
8000	710,8063	632,5018	20,9217
9000	710,6735	632,5004	20,9217
10000	710,5425	632,5000	20,9217
11000	710,4132	632,5007	20,9217
12000	710,2857	632,5025	20,9217
13000	710,1599	632,5052	20,9217
14000	710,0359	632,5091	20,9217
15000	709,9136	632,5140	20,9217
16000	709,7930	632,5199	20,9217
17000	709,6742	632,5268	20,9217
18000	709,5571	632,5349	20,9217
19000	709,4417	632,5439	20,9217
20000	709,3281	632,5540	20,9217
21000	709,2163	632,5652	20,9217
22000	709,1062	632,5774	20,9217
23000	708,9978	632,5906	20,9217
24000	708,8912	632,6049	20,9217
25000	708,7863	632,6202	20,9217
26000	708,6832	632,6366	20,9217
27000	708,5818	632,6540	20,9217
28000	708,4821	632,6725	20,9217
29000	708,3842	632,6920	20,9217
30000	708,2880	632,7126	20,9217
31000	708,1936	632,7342	20,9217
32000	708,1009	632,7568	20,9217
33000	708,0100	632,7805	20,9217
34000	707,9208	632,8053	20,9217
35000	707,8333	632,8311	20,9217
36000	707,7476	632,8579	20,9217
37000	707,6636	632,8858	20,9217
38000	707,5814	632,9147	20,9217
39000	707,5009	632,9447	20,9217
40000	707,4221	632,9757	20,9217
41000	707,3451	633,0078	20,9217
42000	707,2699	633,0409	20,9217
43000	707,1963	633,0750	20,9217
44000	707,1246	633,1102	20,9217
45000	707,0545	633,1465	20,9217
46000	706,9862	633,1837	20,9217

47000	706,9197	633,2221	20,9217
48000	706,8549	633,2615	20,9217
49000	706,7918	633,3019	20,9217
50000	706,7305	633,3434	20,9217
51000	706,6709	633,3859	20,9217
52000	706,6131	633,4294	20,9217
53000	706,5570	633,4740	20,9217
54000	706,5026	633,5197	20,9217
55000	706,4500	633,5664	20,9217
56000	706,3991	633,6141	20,9217
57000	706,3500	633,6629	20,9217
58000	706,3026	633,7127	20,9217
59000	706,2570	633,7636	20,9217
60000	706,2131	633,8155	20,9217
61000	706,1709	633,8685	20,9217
62000	706,1305	633,9225	20,9217
63000	706,0918	633,9776	20,9217
64000	706,0549	634,0337	20,9217
65000	706,0197	634,0909	20,9217
66000	705,9863	634,1490	20,9217
67000	705,9546	634,2083	20,9217
68000	705,9246	634,2686	20,9217
69000	705,8964	634,3299	20,9217