



Návrh a simulace provozu mřížové sítě ve městě Klatovy

Design and Simulation of Meshed Distribution Network in City of Klatovy

Bc. Lukáš Havlíček

Diplomová práce

Vedoucí práce: Ing. Tadeusz Sikora, Ph.D.

Ostrava, 2022

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Lukáš Havlíček

Studijní program:

N0713A060003 Elektroenergetika

Téma:

Návrh a simulace provozu mřížové sítě ve městě Klatovy
Design and Simulation of Meshed Distribution Network in City of
Klatovy

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

Teoretický rozbor částí městských distribučních sítí
Výpočet chodu mřížové sítě
Simulace výpadku napáječů

Seznam doporučené odborné literatury:

Hradílek, Z.: Elektroenergetika II. VŠB Ostrava 1993
Pavlovský, B.: Elektrické sítě v městech a sídlištích. SNTL 1975
Horák, K.: Výpočet elektrických sítí. SNTL 1980

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Tadeusz Sikora, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2021

Datum odevzdání: 30.04.2022

prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry

prof. Ing. Jan Platoš, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Předložená diplomová práce pojednává o historickém vývoji distribuční soustavy v České republice, druhů distribučních sítí a dále je více soustředěna na mřížové sítě, jejich výhody a nevýhody a také jištění mřížových sítí. V praktické části se pojednává o modelování stávající paprskové sítě ve městě Klatovy včetně zhodnocení a dále je simulován přechod na mřížovou síť a také poruchové stavy v síti jako jsou výpadky dvou napáječů, přičemž se uvažuje vždy pouze výpadek jednoho napáječe. Veškeré výpočty byly provedeny pomocí dispečerského programu DNCalc.

Klíčová slova

Mřížová síť; Transformátor; Distribuční síť; Spolehlivost; Paralelní chod transformátorů; Simulace sítě, DNCalc

Abstract

The submitted diploma thesis deals with the historical development of the distribution system in the Czech Republic, types of distribution networks and is also more focused on mesh networks, their advantages and disadvantages, as well as securing mesh networks. The practical part deals with the modeling of the existing beam network in the city of Klatovy, including evaluation, and also simulates the transition to the mesh network and fault conditions in the network such as failures of two power supplies, while always considering the failure of one power supply. All calculations were performed using the DNCalc dispatching program.

Key words

Mesh network; Transformer; Distribution network; Reliability; Parallel operation of transformers; Network simulation; DNCalc

Poděkování

Nejdříve bych rád poděkoval vedoucímu mé diplomové práce, jímž je Ing. Tadeusz Sikora za podnětné rady a odbornou pomoc, kterou mi poskytoval při zpracování mé diplomové práce a za čas, který mi věnoval. Také bych rád poděkoval specialistům rozvoje DS ze společnosti ČEZ Distribuce, a.s., kteří mi poskytovali odborné konzultace a jejich zkušenosti z praxe. Rád bych poděkoval také mé manželce Mgr. Kateřině Havlíčkové, která mě při vytváření této práce podporovala, a bez její pomoci by nebylo možné práci dokončit.

Obsah

Úvod	10
1. Teoretický úvod	11
2. Rozvodné distribuční soustavy	13
2.1 Paprskové sítě.....	15
2.2 Okružní sítě.....	17
2.3 Mřížové sítě	19
2.3.1 Zjednodušené mřížové sítě.....	20
2.3.2 Klasické mřížové sítě.....	20
2.3.3 Zkušenosti z provozu mřížové sítě.....	21
2.3.4 Výhody mřížových sítí.....	22
2.3.5 Nevýhody mřížových sítí.....	22
3. Navrhování mřížových sítí	24
3.1 Jištění v mřížových sítích	24
4. Požadavky kladené na městské sítě	25
4.1 Kvalita elektrické energie	25
4.2 Spolehlivost dodávky elektrické energie	26
4.3 Zásady pro zabezpečení dodávky elektrické energie	26
4.4 Možnost snadného rozšiřování zařízení	27
4.5 Přehlednost distribuční sítě.....	27
4.6 Ekonomický provoz sítě.....	27
4.7 Ekonomický návrh sítě.....	28
5. Paralelně provozované transformátory	29
5.1 Stejný převod.....	30
5.2 Hodinový úhel.....	30
5.3 Napětí nakrátko.....	30
5.4 Simulování nesplnění podmínek pro paralelní chod	31
5.4.1 Nesplnění podmínky stejného převodu	31
5.4.2 Nesplnění podmínky hodinového úhlu	32
5.4.3 Nesplnění podmínky stejného u_k	32
6. Hlediska návrhu elektrického vedení	33
6.1 Hledisko mechanické pevnosti	33
6.2 Hledisko oteplení.....	33
6.3 Hledisko úbytku napětí.....	34
6.4 Hledisko hospodárnosti.....	34
6.5 Hledisko bezpečnosti zařízení a bezpečnosti osob.....	34
6.6 Hledisko kvality a zabezpečení dodávky elektrické energie.....	34
6.7 Hledisko zajištění dodávky	35
6.8 Kabelová vedení	35
7. Návrh mřížové sítě ve městě Klatovy	37
7.1 Stávající stav	37
7.2 Výpočty navržené mřížové sítě v městě Klatovy	37
7.3 Výpočetní metoda	38
7.3.1 Předpoklady pro simulaci	39

7.4	Zadávání parametrů prvků	39
7.5	Prvky v síti a jejich parametry.....	41
7.6	Modelování sítě ve výchozím stavu.....	43
7.6.1	Modelování paprskové sítě s navýšením spotřeby o 100%.....	45
7.7	Modelování nové mřížové sítě	46
7.7.1	Modelování mřížové sítě s navýšením spotřeby o 100%	48
7.8	Modelování poruchových stavů	49
7.8.1	Simulace sítě s výpadkem napáječe VN0001	49
7.8.2	Simulace sítě s výpadkem napáječe VN0002	51
8.	Závěr	53

Seznam obrázků

Obrázek 1 – Schéma přenosové soustavy [24].....	11
Obrázek 2 – Dlouhodobý vývoj spotřeby v ČR [25].....	12
Obrázek 3 – Tři úrovně napětí v distribuční soustavě [4].....	14
Obrázek 4 – Úbytky napětí u napájení z jedné strany.....	15
Obrázek 5 – Paprsková síť [4].....	16
Obrázek 6 – Paprsková síť s průběžným rozvodem [4].....	16
Obrázek 7 – Okružní síť se zasmyčkováním paprsků [4].....	18
Obrázek 8 – Úbytky napětí u napájení ze dvou stran.....	18
Obrázek 9 – Mřížová síť [4].....	19
Obrázek 10 – Klasická mřížová síť [10].....	21
Obrázek 11 – Zabránění zpětného napájení místa poruchy [10].....	24
Obrázek 12 – Paralelně zapojené transformátory [16].....	29
Obrázek 13 – Model sítě pro simulace nesplnění podmínek pro paralelní chod.....	31
Obrázek 14 – Silový kabel AYKY [27].....	36
Obrázek 15 – Zjednodušený model mřížové sítě v ustáleném stavu.....	38
Obrázek 16 – Zadávání parametrů napájecího uzlu pro výpočty ve třífázovém modelu.....	39
Obrázek 17 – Zadání parametrů transformátoru pro výpočty v jednofázovém modelu.....	40
Obrázek 18 – Zadání parametrů vedení pro výpočty v jednofázovém modelu.....	40
Obrázek 19 – Zadání parametrů zátěže pro výpočty v jednofázovém modelu.....	40
Obrázek 20 – Model sítě v softwaru DNCalc.....	45

Seznam tabulek

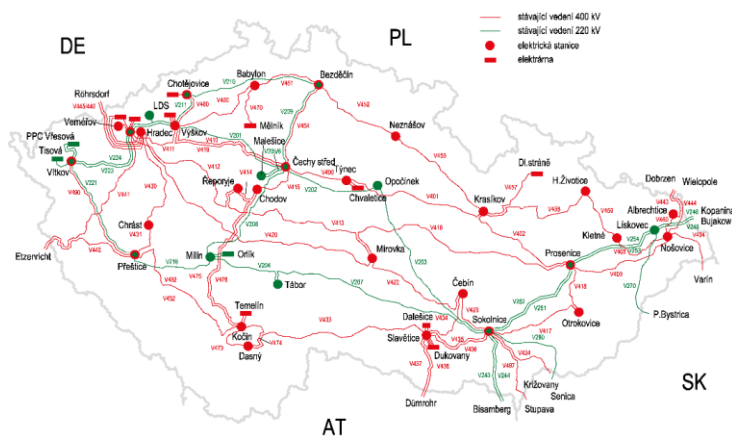
Tabulka 1 – Porovnání distribučních sítí [2]	22
Tabulka 2 – Hodnoty transformátorů při splnění podmínek	31
Tabulka 3 – Hodnoty transformátorů při splnění podmínky stejného převodu	31
Tabulka 4 – Hodnoty transformátorů při nesplnění podmínky hodinového úhlu	32
Tabulka 5 – Hodnoty transformátorů při nesplnění podmínky stejného napětí nakrátko	32
Tabulka 6 – Vypočítané hodnoty pro napáječe	41
Tabulka 7 – Odběry na jednotlivých vývodech z trafostanice	41
Tabulka 8 – Parametry kabelového vedení v modelované síti	43
Tabulka 9 – Vypočítané hodnoty pro napáječe	43
Tabulka 10 – Vypočítané hodnoty pro transformátory napájené z napáječe VN0001	43
Tabulka 11 – Vypočítané hodnoty pro transformátory napájené z napáječe VN0002	43
Tabulka 12 – Velikosti napětí a úbytku napětí v uzlech sítě	44
Tabulka 13 – Zatížení transformátorů při zvýšení spotřeby o 100% v paprskové síti	45
Tabulka 14 – Zatížení transformátorů při zvýšení spotřeby o 100% v paprskové síti	46
Tabulka 15 – Zatížení napáječů při zvýšení spotřeby o 100% v paprskové síti	46
Tabulka 16 – Vypočítané hodnoty pro napáječe v mřížové síti v bezporuchovém stavu	46
Tabulka 17 – Vypočítané hodnoty pro transformátory napájené z napáječe VN001 v mřížové síti v bezporuchovém stavu	47
Tabulka 18 – Vypočítané hodnoty pro transformátory napájené z napáječe VN0002 v mřížové síti v bezporuchovém stavu	47
Tabulka 19 – Vypočítané hodnoty pro transformátory napájené z napáječe VN0002 v mřížové síti v bezporuchovém stavu	47
Tabulka 20 – Porovnání zatížení transformátorů v mřížové síti vs. paprskové síti	48
Tabulka 21 – Zatížení transformátorů při zvýšení spotřeby o 100% v mřížové síti	48
Tabulka 22 – Zatížení transformátorů při zvýšení spotřeby o 100% v mřížové síti	49
Tabulka 23 – Zatížení napáječů při zvýšení spotřeby o 100% v mřížové síti	49
Tabulka 24 – Zatížení transformátorů při výpadku napáječe VN0001 bez úpravy sítě	49
Tabulka 25 – Zatížení napáječe VN0002 při výpadku napáječe VN0001 bez úpravy sítě	50
Tabulka 26 – Kabely s největším úbytkem při výpadku napáječe VN0001 bez úpravy sítě	50
Tabulka 27 – Zatížení transformátorů při výpadku napáječe VN0002	51
Tabulka 28 – Zatížení napáječe VN0002 při výpadku napáječe VN0002	51
Tabulka 29 – Kabely s největším úbytkem při výpadku napáječe VN0002	51

Úvod

Předmětem této diplomové práce je popis historického vývoje distribučních sítí v České republice a popis nejpoužívanějších sítí s větším zaměřením na mřížové sítě včetně jejich výhod a jejich nevýhod. V praktické části se diplomová práce zabývá návrhem mřížové sítě ve městě Klatovy za pomoci software DNCalc, který se používá pro zjišťování poměrů a stavů v sítích. Ve stávajícím stavu se ve městě Klatovy v blíže nespecifikované části nachází šest oddělených paprskových sítí s dvěma vysoko napěťovými napaječi. Tato diplomová práce by měla sloužit jako podklad pro přechod na mřížové sítě, přičemž by v rámci této diplomové práce měly být posouzeny i poruchové stavy sítě, kdy bude daná mřížová síť napájena pouze jedním napáječem.

1. Teoretický úvod

Elektrizační soustava je tvořena zdroji, elektrickými stanicemi a sítěmi. Zdroje elektrické energie jsou přímo napojeny do soustav o napětí 220 kV, nebo 400 kV. Mohou být zapojeny do sítí s napětím 110 kV, které jsou zapojeny do sítě přes zvyšovací transformátory. Sítě s hladinou napětí 220 kV se nebudou už dále rozvíjet. Pro transformaci na nižší napěťovou hladinou se v uzlech přenosové soustavy neboli v elektrických stanicích umísťují transformátory 400/110 kV, nebo 220/110 kV, kdy z těchto stanic jsou dále napájeny veřejné rozvodné soustavy neboli distribuční soustavy. Elektrické stanice jsou nepostradatelnou součástí elektrizační soustavy a propojují se jimi sítě různých napěťových hladin a proudových soustav. Elektrické stanice se musí umísťovat optimálně a strategicky a musí být navrženy tak, aby umožňovaly transfigurace soustavy. Elektrickými sítěmi se rozumí všechny galvanicky spojené části stejného napětí. [12]

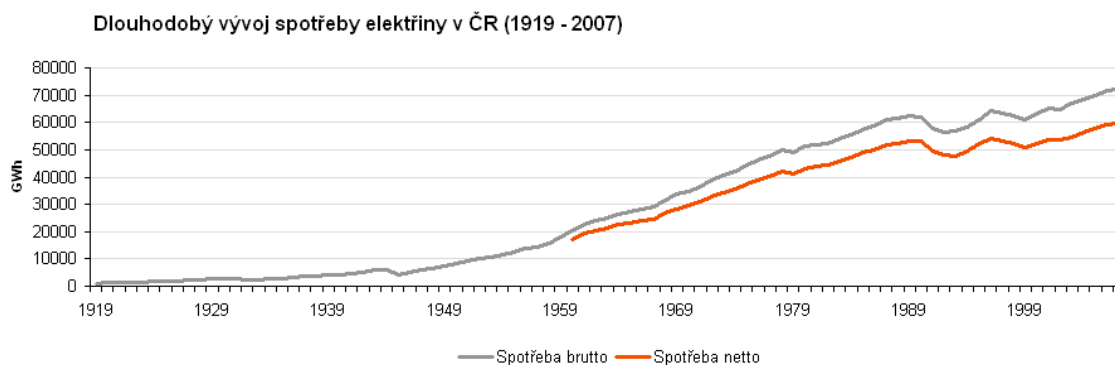


Obrázek 1 – Schéma přenosové soustavy [24]

Aby elektrizační soustava mohla plnit úkoly, které pro ni vyplývají, tak musí elektrizační soustava i každá její část nejvhodnějším způsobem plnit zajištění bezpečnosti osob, zajištění dostatečné, spolehlivé a kvalitní dodávky elektrické energie spotřebitelům, výrazně snižovat pracnost prací v provozu a v údržbě soustavy, pracovat s vysokou účinností, využívat odpadního tepla, umožňovat řízení odběru elektrické energie, být materiálně nenáročná, zabraňovat nepříznivým vlivům soustavy na okolí a na životní prostředí.[10]

Distribuční rozvodná soustava je tedy napájena z uzlových stanic 400/110 kV z přenosové soustavy a napájí sítě městského, venkovského, či průmyslového charakteru, anebo elektrickou trakci. Elektrické sítě městské části jsou součástí distribuční soustavy a často se nachází v blízkosti průmyslových závodů, které také napájí. Elektrické sítě ve městech měly ve svém vývoji několik hladin napětí, jež se vyvíjely na začátku 20. století, přičemž odpovídaly poznatkům a vývoji technologie izolací. Dříve bylo normální, že menší odběr elektrické energie byl soustředěn především ve městech s odběrem v řádu desítek až

stovek kilowatt, a tak nepožadoval elektrárny s vyšším výkonem. Rozvodné sítě VN byly dříve napojeny přímo na napětí alternátoru. Poté, co se stále rozvíjel průmysl v elektroenergetice, se rozšiřovaly asynchronní motory, zdokonalovaly se žárovky, rostl počet domácích spotřebičů, rostla spotřeba elektrické energie, a tak napětí 2 kV, 3kV a 5,25 kV nestačilo. V důsledku toho se začalo přestupovat více na napětí 6 kV a v nově vybudovaných oblastech na standardizované napětí 380/220 V a ve středech měst zůstávalo starší napěťový hladina 2/0,12 kV, přičemž v přilehlých oblastech, kde se budovala nová síť později se stavěly sítě s napětím 6/0,4 kV. [11]



Obrázek 2 – Dlouhodobý vývoj spotřeby v ČR [25]

Historický vývoj napěťových hladin byl ovlivněn i elektrizací venkovských oblastí, tudíž menší města, která byla elektrifikací zasažena později než větší města, byla stejně obklopena sítí VN 22 kV nebo i 15 kV, vhodnou pro distribuci elektrické energie ve venkovských oblastech. Později z těchto dvou hladin zůstalo napětí 22 kV, které se pokládá za hospodárnější. V roce 1920 zásluhou elektrifikace a Elektrotechnického svazu československého bylo dosaženo napětí 22 kV 6 kV a 0,4 kV a hladiny 15 kV a 10 kV kabelového a venkovního vedení se dále neujaly. Díky této volbě se posunula Československá republika na přední místa v elektrifikaci, kdežto ve Francii a Německu napětí 10 kV a 15 kV byla teprve zavedena. [8] [7]

Navzdory tomu, že Československo začalo s elektrifikací později než západní země tak i dále přichází s dalšími moderními rozhodnutími novátorského významu, kdy se rozhodlo o další hladině napětí 110 kV, zatímco v ostatních zemích se zatím zaváděla hladina 60 kV. Větší města měla sítě s hladinami 110/22/6/0,4 kV nebo 110/35/3/0,4 kV, přičemž byly hladiny 6 kV někdy nahrazena napětím 5,25 kV či 3 kV. V 50. letech vznikaly studie o změnách městských distribučních sítí, kdy mělo dojít k menšímu množství transformací. Transformační stanice o výkonu 75, 100, 160 nebo 200 kVA přestaly být dostačující a neekonomické pro větší měrné zatížení v MVA/km² a byly nahrazovány transformátory o vyšších výkonech 250, 400, 630 nebo 1 000 kVA. V některých případech i v paralelním provozu 2x 400 kVA, 2x 630 kVA nebo 2x 1 000 kVA. Hustota odběru elektrické energie pro města se udává 7 MVA/km² a pro centra měst až 15 MVA/km². [11]

2. Rozvodné distribuční soustavy

Velký růst plošného rozložení a také velikost odběru elektrické energie vyžaduje velice pečlivou analýzu sledující jak stávající, tak i budoucí spotřebu elektrické energie. Distribuční soustava propojuje přenosovou soustavou a odběratele elektrické energie. Během distribuce se postupně upravují parametry napěťové úrovně, za účelem dodávky elektrické energie v požadované kvalitě a množství a také za účelem minimalizace ztrát. Ztráty, které vzniknou během transportu elektrické energie, jsou závislé na impedanci přenosového vedení a od druhé mocniny protékajícího proudu. [3] [22]

$$P_z = Z \cdot I^2$$

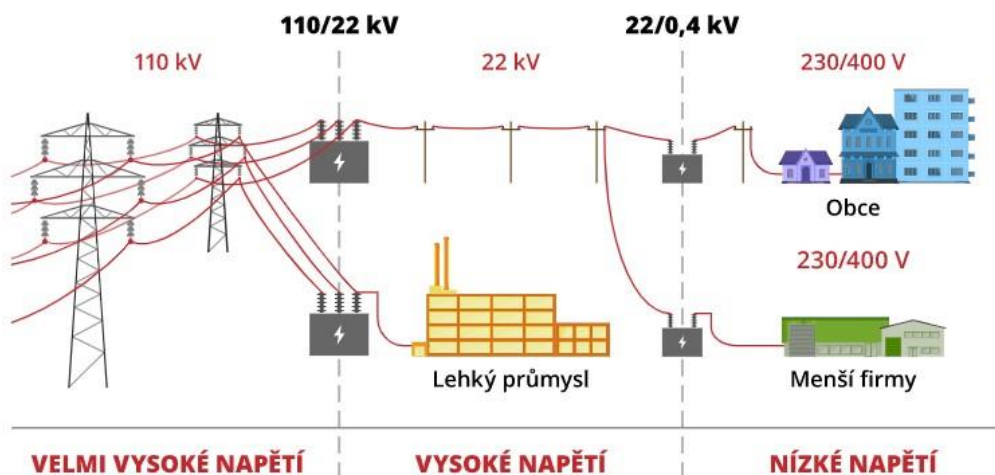
kde:

- P_z – ztrátový výkon měnící se na teplo [W],
- Z – impedance přenosového vedení [Ω],
- I – protékající proud [A].

Z toho důvodu se k přenosu velkých výkonů na velké vzdálenosti (dlouhá vedení) využívá zvláště vysoké napětí 400 kV nebo velmi vysoké napětí 220 kV s poměrně nízkým proudem. Vysokonapěťový přenos má ale svá specifika, vedení jsou drahá, rozměrově velká, práce s vysokým napětím vyžaduje náročná zařízení, a proto není možné dopravovat elektřinu ke koncovým odběratelům tímto způsobem. Úlohou navazující distribuční soustavy je postupné snižování napětí transportované energie prostřednictvím distribučních transformátorů a dalších zařízení a rozdělování přenášeného výkonu do více větví o nižším napětí. Čím je nižší napětí, tím by mělo být kratší distribuční vedení.

V transformačních stanicích distribuční soustavy se velmi vysoké napětí 110 kV snižuje na úroveň vysokého napětí. V různých částech republiky je historicky rozdílná napěťová úroveň linek vysokého napětí. Převládá napěťová hladina 22 kV. V části severních a východních Čech se lze setkat s napětím 35 kV a spíše lokálně se vyskytují distribuční sítě s napětím, které je nižší než 22 kV (obvykle 10, 6 a 3 kV). Tyto nižší napěťové úrovně se již dále nerozvíjejí a při rekonstrukcích se spíše nahrazují standardní úrovní 22 kV. Topologicky se většinou jedná o paprskové sítě, kdy z transformační stanice je vedeno několik vysokonapěťových vedení, napájejících jeden nebo několik nízkonapěťových distribučních transformátorů pro pokrytí menších oblastí se zástavbou nebo průmyslem. Důležitá vysokonapěťová vedení, tzv. kmenové linky, jsou často napájena ze dvou i více transformoven. Z důvodu zajištění distribuce elektřiny i při nestandardních stavech v síti mohou být tyto hlavní linky ještě vzájemně propojeny. Přípojky jednotlivých koncových transformačních stanic na nízké napětí se nachází na odbočkách základních kmenových linek.

Distribuční síť nízkého napětí tvoří poslední stupeň transformace elektrické energie a slouží přímo k napájení odběrných míst koncových zákazníků. Nízkonapěťová vedení nebo kabely vychází většinou paprskovitě z transformační stanice, kde se energie transformuje z vysokého napětí na standardní unifikované napětí $3 \times 400/230$ V s frekvencí 50 Hz. V městské zástavbě se spíše používá uzlová síť nízkého napětí, tvořená systémem podzemních kabelových rozvodů.



Obrázek 3 – Tři úrovně napětí v distribuční soustavě [4]

Distribuční soustava je propojovací technologie pro distribuci elektrické energie a skládá se ze vzájemně propojených vedení, strojů a přístrojů na napěťových hladinách VVN, VN a NN, kromě vybraných vedení a zařízení na hladině VVN o napětí 110 kV, která jsou součástí přenosové soustavy. Soustava se skládá ze zařízení sloužících k distribuci elektrické energie a systémů pro měření, chránění a řízení sítě. Dále sem patří informační, telekomunikační a zabezpečovací technika počítaje elektrických přípojek vlastněných provozovateli distribučních soustav. Nejdůležitějším úkolem distribuční soustavy je zajištění zásobování elektrickou energií v požadovaném čase, na požadovaném místě a v potřebném množství, při dodržení kvality a spolehlivosti dodávky s ohledem na hospodárnost, přičemž za všechny výše popsané úkoly zodpovídá provozovatel distribuční soustavy.

Distribuční soustava přenáší elektrickou energii z přenosové soustavy mezi jednotlivé koncové uživatele, a tedy je poslední část před odběratelem a tvoří nejrozsáhlejší část v elektrizační soustavě. Distribuční síť mohou být realizované kabelovým vedením anebo venkovním vedením. Nejvíce se rozvíjí kabelová síť, a to především ve městech. Venkovní vedení se spíše používá v místech s menší hustotou odběratelů. Zároveň distribuční síť slouží pro připojování malých elektráren a jiných výroben elektrické energie o výkonech řádově v desítkách MW. Způsob provozu DS odpovídá hladině přenášeného napětí.

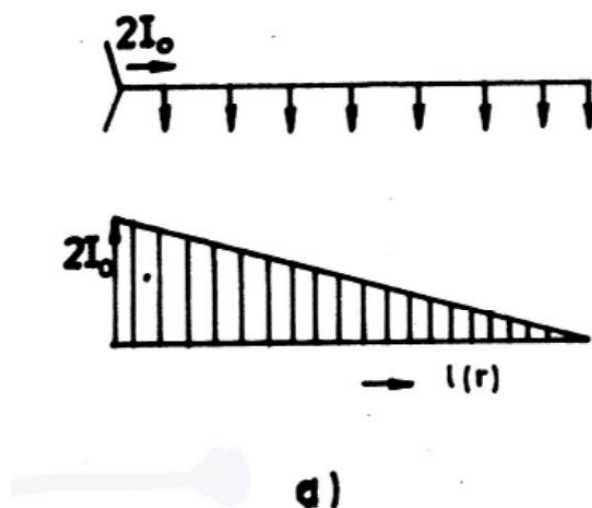
V České republice se mezi hlavní provozovatele distribučních soustav řadí společnosti ČEZ Distribuce, a. s., společnost EG. D, a. s. a společnost PREdistribuce, a. s., provozující distribuční soustavu na území Hlavního města Prahy.

Topologie distribučních sítí se dělí následovně:

- Paprskové sítě.
- Okružní sítě.
- Mřížové sítě:
 - Zjednodušené mřížové sítě.
 - Klasické mřížové sítě.

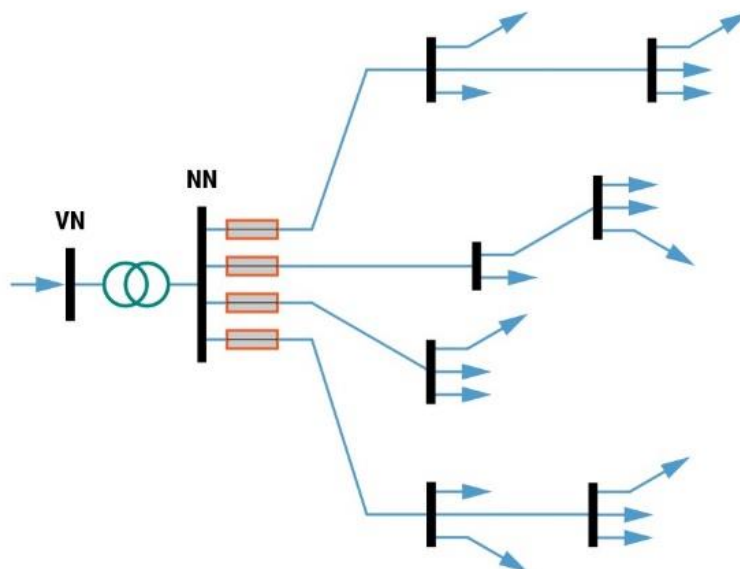
2.1 Paprskové sítě

Napájecí vedení vychází u paprskových sítí z napájecího místa, a to z transformovny nebo spínací stanice a napájení jednotlivé odběry zapojené do sítě. Každý paprsek nebo každá větev v síti je nezávislá a nesmí se navzájem propojovat. Zapojení paprskové sítě je zpravidla nejlevnější, nicméně garance zásobování elektrickou energií je nejmenší. Vzniklá závada v určitém místě paprsku znamená, že zbývající odběry za touto nebudou napájeny. Topologie paprskové sítě se nachází na obrázku níže. [2]



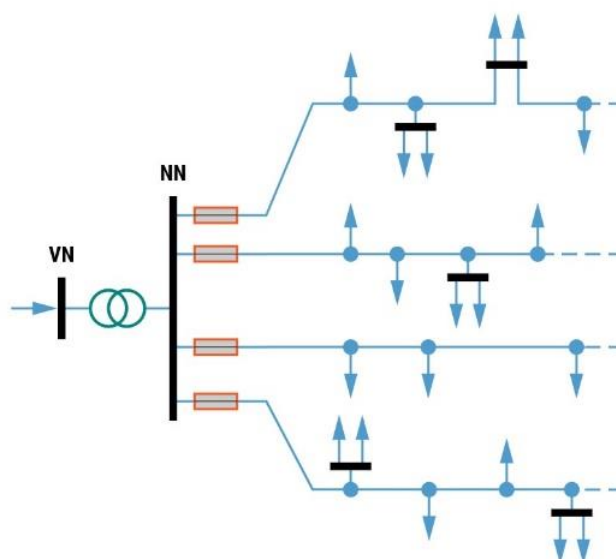
Obrázek 4 – Úbytky napětí u napájení z jedné strany

Vedení se zde používá kabelové a venkovní vycházející z napájecího místa. Přerušení dodávky může být několik hodin, ale také i dnů podle dostupnosti dané oblasti. Tento typ sítí se používá ve venkovských oblastech, menších městech nebo v průmyslu u sítí VN a VVN. [3]



Obrázek 5 – Paprsková síť [4]

Když je napájecí paprsek delší a rozvodnice nebo spotřebiče jsou k němu průběžně napojeny pomocí odboček, tak se jedná o radiální síť s průběžným rozvodem. V sítích NN se mnohdy užívá k napájení malých odběrů anebo pouličního osvětlení. Při jednostranné, napájení dlouhých paprsků může docházet ke kolísání napětí na druhém konci paprsku. Paprskovitá topologie sítě se používá i u nadřazených sítí VN. Celý paprsek je opět napájený z jednoho napáječe a při závadě na tomto paprsku je bez elektrické energie velký počet spotřebitelů, jelikož není žádná alternativní varianta napájení. Následné vyhledání poruchy v síti se dělá odpínáním dílčích odboček anebo úseků zasaženého vedení, dokud není místo poruchy odhaleno. [4]



Obrázek 6 – Paprsková síť s průběžným rozvodem [4]

Vzorce pro výpočty úbytky napětí a ztrát při napájení pouze z jedné strany:

$$\Delta U = \int_0^R (2 \cdot I_0 - r \cdot i)^2 dr \approx 4 \cdot I_0^2 \cdot R$$

Kde

$$i = \frac{2 \cdot I_0}{R}$$

$$\Delta P \approx 3 \int_0^R (2 \cdot I_0 - r \cdot i)^2 dr \approx 4 \cdot I_0^2 \cdot R$$

2.2 Okružní síť

Postupným zahušťováním odběru se síť zahušťovala a vznikaly síť okružní. Okružní síť se provozují jako rozepnuté nebo sepnuté. Paprsky či polosmyčky jsou navrženy tak, aby se daly v případě potřeby sepnout. Síť okružní jsou nákladnější než paprskové, z toho důvodu, že pro vzájemné propojení je třeba větších vzdáleností, ale u vzniku poruchy lze u vedení snadno postižený obvod odepnout na vývod sousední, a to automaticky nebo ručně. Přerušení dodávky elektřiny může trvat pár sekund, nebo až 1 hodinu a více.

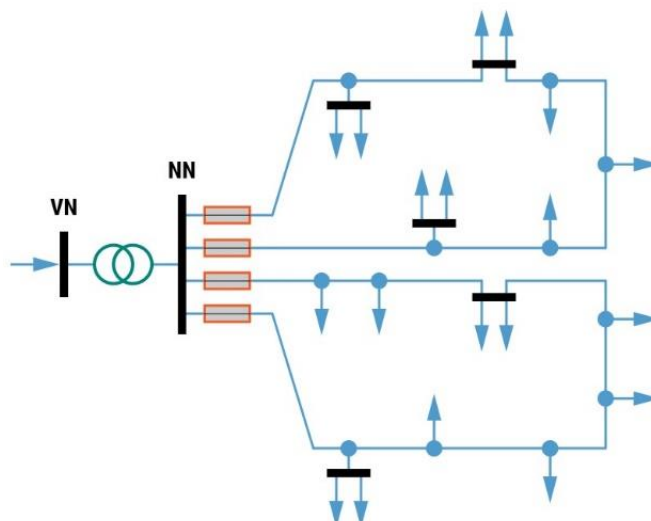
Další předností okružních sítí při rozepnutém provozu je schopnost odlehčení přetížených větví přepnutím na vývod, který je zatížený méně a alespoň takto regulovat zatížení větví. Provozování okružních sítí je přehledné a nenáročné, a proto je tento typ rozvodu v praxi užíván pro síť NN, VN a VVN. Okružní síť při sepnutém režimu, a tedy s napájením ze dvou zdrojů, se používají hlavně pro velké hustoty odběru ve městech a větších obcích.

$$\Delta U \approx \int_0^{\frac{R}{2}} (I_0 - r \cdot i)^2 dr \approx \frac{1}{4} \cdot I_0^2 \cdot R$$

$$\Delta P \approx 6 \int_0^{\frac{R}{2}} (I_0 - r \cdot i)^2 dr \approx I_0^2 \cdot R$$

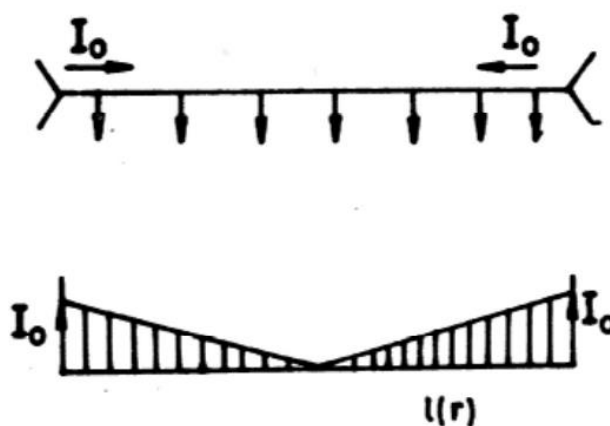
Z této jednoduché úvahy jsou patrné výhody zauzlené sítě, a to snížení úbytku napětí i snížení ztrát na čtvrtinu. Jedním z možných řešení zauzlených sítí je také mřížová síť, která je vhodná pro městské aglomerace.

Části okružních sítí i napáječe NN se jistí vždy pojistkami. Komplikované jsou také ochrany u okružních sítí, kdy se užívají směrové ochrany a distanční relé. Tam kde je potřeba mít vyšší požadavek na bezpečnou dodávku elektrické energie se instalují spíše okružní síť než paprsková, která je také i hospodárnější. Nízko napěťové paprskové sítě se realizují především v menších obcích, zatímco ve větších obcích a městech se staví okružní a mřížové sítě. Okraje měst v důsledku nových zástaveb disponují mnohdy paprskovými sítěmi.



Obrázek 7 – Okružní síť se zasmyčkováním paprsků [4]

Řešením problému dlouhých paprsků je jejich zasmyčkování. Tím se rozumí připojení volného konce paprsku na tu samou přípojnicí, z které je paprsek napájen. Zasmyčkováním vedení vzniká okružní síť s menším kolísáním napětí. Velkou výhodou odběrných míst nebo rozvaděčů v uzavřeném okruhu je možnost jejich napájení ze dvou stran.



Obrázek 8 – Úbytky napětí u napájení ze dvou stran

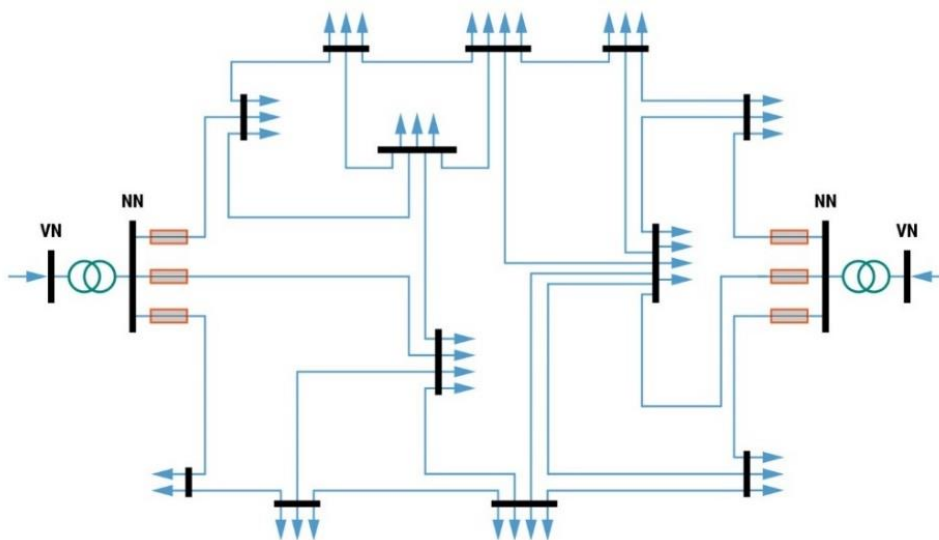
Důležité spotřebiče tak mají vyšší spolehlivost dodávek elektrické energie. I když vznikne v některém místě okruhu poruchový stav, tato část se izoluje (odpojí) a rozpojený okruh se dočasně provozuje ve formě dvou samostatných paprsků. V distribuční síti pracují ve zdvojeném zakruhovaném zapojení také sítě velmi vysokého napětí 110 kV. Porucha na libovolné části vedení, při tomto zapojení, zpravidla nemá vliv na spolehlivost dodávky elektřiny. Vyčleněním poruchového úseku vedení a okamžitou automatickou rekonfigurací sítě většinou nedochází k omezení dodávky zákazníkům. V sítích nízkého napětí se okružní sítě používají u kabelových rozvodů. [4]

2.3 Mřížové sítě

Ještě bezpečnější, z pohledu dodávky elektrické energie, je mřížová síť. Vzniká vzájemným propojením většího množství podružných rozvaděčů, připojených prostřednictvím distribučních transformátorů na minimálně dva primární napájecí zdroje. Charakteristikou mřížové sítě je skutečnost, že každé odběrné místo může být napájeno z několika (minimálně ze dvou) stran. Mřížová síť často pokrývá velká území s četnými odběry, ale navzdory tomu má ze všech topologických zapojení nejmenší kolísání napětí a nejvyšší provozní spolehlivost.

Určitou nevýhodou těchto sítí je větší finanční náročnost a v důsledku propojenosti i větší zkratové poměry. Pokud je distribuční síť nízkého napětí mřížová, je obvykle nadřazená místní síť vysokonapěťových napájecích vedení, čistě radiální. Nejčastěji se uzlové sítě kabely propojených rozvaděčů využívají v husté městské zástavbě a k napájení větších průmyslových podniků. Velká variabilita napájecích cest zvyšuje množství alternativ provozu sítě, i když v určitých variantách nemusí být maximální propustnost kabelů optimálně využita.

Distribuční sítě, skládající se ze tří napěťových úrovní, bývají většinou koncipovány jako okružní na úrovni velmi vysokého napětí a převážně jako radiální na úrovni vysokého napětí. Na úrovni nízkého napětí jsou sítě provozovány jako paprskové nebo uzlové, ve výjimečných případech i jako okružní. Konkrétní zapojení závisí na mnoha faktorech a většinou reflektuje technické a finanční možnosti i historické souvislosti. Specifické uzlové sítě se nejčastěji využívají ve městech. [4]



Obrázek 9 – Mřížová síť [4]

2.3.1 Zjednodušené mřížové sítě

Zjednodušená mřížová síť se skládá z mnoha navzájem spojených okružních sítí, které jsou napájeny z aspoň ze dvou distribučních trafostanic, které jsou okružně propojeny magistrálami neboli vedením se silnějším průřezem, které se na vývodu z transformátoru jistí výkonovými pojistkami silné vazby. Na vhodných místech v rozpojovacích skříních, v místech kritického průřezu, jsou umístěny pojistky slabé vazby jejichž velikost jmenovitého proudu se volí 2:1 nebo 3:1 oproti pojistkám silné vazby. V případě poruchy se nejdříve přerouší selektivně pojistky slabé vazby až potom pojistky silné vazby a je odpojena pouze část s poruchou a ve zbytku mřížové sítě není poznat, že nastala porucha. Charakteristikou uzlové sítě je skutečnost, že každé odběrné místo může být napájeno minimálně ze dvou stran.

Důležitým faktorem zde je napaječ, který je dostatečně dimenzovaný pro zatížení dané sítě. Na straně NN je zde venkovní vedení. Zjednodušená mřížová síť je schopná reagovat pouze na závady na straně NN. V případě poruchy na straně NN mohou proudy ze strany NN téct do hladiny VN přes distribuční transformátor a z tohoto důvodu se do trafostanice umísťují směrové ochrany, které hlídají tok proudu, přičemž instalace těchto ochrany zvyšuje cenu instalace. Transformátory pro napájení mřížové sítě jsou napájeny jedním VN vedením.

2.3.2 Klasické mřížové sítě

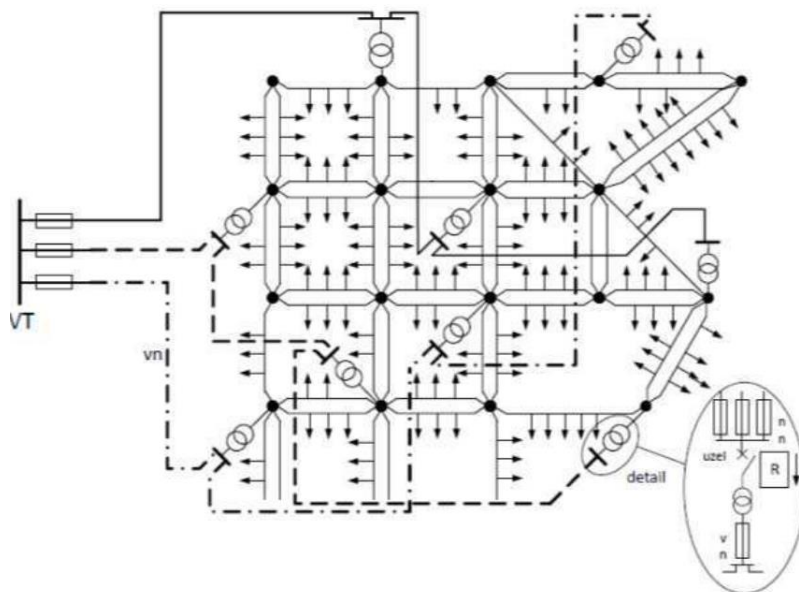
Klasické mřížové sítě jsou využívány pro napájení velkých měst s hustotou 1 MW km^{-2} a větší. Pro napájení je využíváno několik trafostanic, které jsou napájeny ze dvou až pěti napáječů VN a tím je zajištěna vyšší spolehlivost dodávky elektrické energie, menší kolísání napětí a ztráty a lepší využití transformátorů. Vedení na straně NN je provozováno jako kabelové a je spojeno do uzlů prostřednictvím skříní, které se nachází na křižovatkách ulic a obsahují pojistky.

Je důležité pro chod sítě, aby transformátory byly navrhovány s možností výpadku jednoho vedení tak aby zbývající trafostanice byly schopné pokrýt potřebný výkon a nedošlo k nepovolenému poklesu napětí v síti, které má být $400 \text{ V} \pm 10\%$. Klasické mřížové sítě je možné rozdělovat dle množství napájecích transformátorů VVN/VN, podílejících se na napájení příslušné mřížové sítě. Podle tohoto se tedy rozlišují sítě jedno systémové, dvou systémové a více systémové. Charakteristikou uzlové sítě je skutečnost, že každé odběrné místo může být napájeno minimálně ze dvou stran.

Pokud nastane porucha na straně VN tak poteče do místa zkratu proud ze strany NN. Směrová ochrana umístěná ve trafostanicích rozhodne směr toku proudu a zajistí vypnutí jističe. Díky většímu počtu napáječů, ale provoz mřížové sítě nebude omezen. Pokud nastane porucha na straně NN tak síť bude protékat mezi dvěma pojistkovými skříněmi proud vyšší než v ostatních místech sítě. Tento vyšší proud

zapříčiní přetavení pojistek za kratší čas než zbývajících pojistek v síti a daný úsek bude odpojen od dodávky elektrické energie a ostatní vývody zůstávají neporušeny.

Náklady klasické mřížové sítě jsou vyšší než předchozích dvou způsobů provozu. Jedním z důvodů je, že vedení musí být dimenzovaná s vysokou přenosovou rezervou pro přenos energie v případě výpadku některé větve. Klasická mřížová síť je náročná na obsluhu a vyhledávání poruch. Výhodou je vysoká spolehlivost a kvalita elektrické energie.



Obrázek 10 – Klasická mřížová síť [10]

2.3.3 Zkušenosti z provozu mřížové sítě

Ze zkušeností se doporučuje pro paralelní chod projektovat transformátory se stejným uk [%] a ideálně se stejnou hodnotou výkonu S [kVA]. V případě nestejného uk [%] u transformátorů může dojít k výpadku v době převzetí většího zatížení, při poruše nebo odepnutí jiného napáječe. Pokud je potřeba nějaký transformátor odlehčit, namontují se na transformátory na NN straně reaktor, díky kterým se zvedne celková reaktance transformátoru a transformátor se odlehčí až na 93 % jmenovitého proudu. [12]

Standartně se ale umístění transformátorů v síti projektuje tak aby jejich zatížení bylo co nejrovnoměrnější a reaktory pak není potřeba instalovat. Při poruše výkonných pojistek je důležité dbát na to, aby byly nahrazovány pojistkami stejné charakteristiky a stejných jmenovitých hodnot. Pokud nebudou pojistky správně nahrazovány tak, bude docházet k tomu, že se budou pojistky vypínat neselektivně, v různých místech a bude obtížné najít poruchu a ve výjimečných případech může dojít až k rozpadku mřížové sítě. Aby mřížová síť byla stabilní je důležité ji napájet třemi až pěti napáječi, které budou stejně zatěžovány a měly dostatečnou rezervu pro případný výpadek z jednoho nebo dvou

napáječů, přičemž tyto stavy lze při návrhu mřížové sítě různě modelovat a ověřit tak různé typy poruchových stavů. [10] [11]

2.3.4 Výhody mřížových sítí

U mřížových sítí je velkou výhodou, že vznikají nižší přenosové ztráty, protože vzájemným spojením mnoha uzlů dojde k razantnímu zmenšení impedance mezi zdroji a odběrným místem. Pokud tato ztráta bude srovnána s paprskovými sítěmi tak ztráty energie budou nižší až o 30%, díky čemuž bude efektivněji využíváno vedení, a i distribučních transformátory. Mřížové sítě jsou výhodně především pro svou spolehlivost dodávky a kvality elektrické energie, což je dáno hlavně vyšším počtem transformátorů na hladině VN/NN pro příslušnou oblast. [15]

Díky hustému propojení mřížové sítě na straně NN je v případě poruchy dodávky elektrické energie zajištěna z více míst. V případě poruchy dojde k odpojení elektrické sítě pouze v nejbližších rozpojovacích skříních, a to roztavením pojistky slabé vazby a ostatní síť bude normálně bez poruchy v provozu. Pokud by mělo dojít k poruše většího významu tak by muselo v jednu dobu vzniknout několik malých poruch, což je méně pravděpodobné. V důsledku velké hustoty mřížové sítě a díky více napáječům se také snižují nároky na regulování napětí. Odběrná místa jsou napájena vždy z více stran z více distribučních trafostanic, což umožňuje připojení i větších až průmyslových odběrů do velikosti až poloviny jmenovitého výkonu distribučního transformátoru VN/NN. [15]

2.3.5 Nevýhody mřížových sítí

Nevýhodou u mřížových sítí je, že zde vznikají větší zkratové proudy, než u ostatních typů sítí a že je mřížová síť kvůli svému křížení vedení a rozloze je méně přehlednější, ale hlavně více finančně náročná.

Tabulka 1 – Porovnání distribučních sítí [2]

Vlastnosti	Klasická mřížová síť	Zjednodušená mřížová síť	Paprsková síť
Pravděpodobnost výpadku	1	4÷5krát vyšší	9 000 x vyšší
Jistota zásobování	největší	větší	malá
Napětí – kvalita (kolísání) úbytek ΔU	stabilní U, nejmenší ΔU	méně kolísá než v paprskové síti asi $1/2 \Delta U$ než v paprskové síti	nestabilní U velký ΔU
Připojování koncentrovaných odběrů	až do $1/2 S_n$ transformátoru	až do $1/4 S_n$ transformátoru	nelze

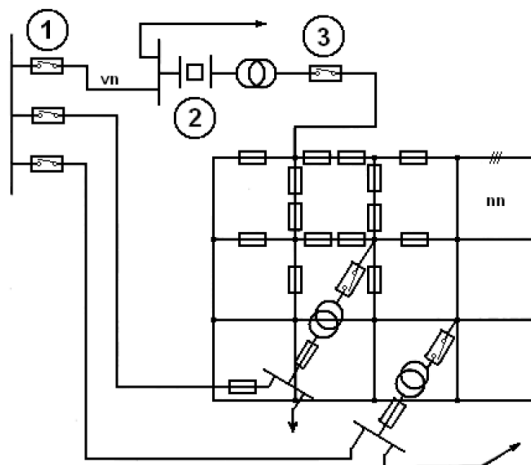
Využití transformátoru a vedení	ušetří 30% S_n transformátoru nejlepší využití	střední	malé využití nestejněměrné zatěžování
Ztráty elektrické energie	až o 30% menší než paprsková síť	střední	velké
Zkratové proudy	nejvyšší	střední	nejnižší
Přehlednost sítě	malá	střední	velká
Zpětné napětí při rozpojení	ano	ano	ne
Poruchy v síti vn	neovlivní napájení	výpadek U	výpadek U
Poruchy v síti nn	neovlivní napájení	neovlivní napájení	výpadek U
Cena zařízení	závisí na zatížení	vyšší	nízká

3. Navrhování mřížových sítí

Zásady pro návrh, výrobu, zkoušky a instalaci zařízení DS, tj. zařízení transformoven, venkovních a kabelových vedení, včetně požadavků na kvalitu musejí vyhovovat příslušným obecným zákonným požadavkům a musejí být v souladu s příslušnými technickými normami ČSN a PNE (EN, dokumenty IEC). Další informace podá na požádání PDS. [21]

3.1 Jištění v mřížových sítích

V mřížových sítích bývá jištění vybudováno na jiném principu selektivity než u sítí okružních či radiálních. Je nutno zabránit zpětnému napájení místa poruchy přes kabelovou síť NN. U transformátoru jsou pojistky a primární napaječe na vývodech ze zdroje opatřeny vypínačem s nadproudovou ochranou. Při zpětném proudu vypíná vypínač, který je umístěn na sekundární straně transformátoru. Tento vypínač nemá nadproudové relé, impulsy dostává ze zpětného relé. V případě zkratu v napaječi, kabelu VN, dojde k vypnutí hlavního vypínače a zároveň i vypínače NN, jelikož do zkratu přijde proud rovněž neporušenými napaječi VN přes síť NN směrovým neboli zpětným relé do transformátoru. Pokud je napáječ v poruše, je odpojen se všemi transformovny, jež napájel, ovšem mřížová síť zůstane v provozu a je napájena zbylými napaječi. [3] [10]



Obrázek 11 – Zabránění zpětného napájení místa poruchy [10]

4. Požadavky kladené na městské sítě

Distribuční soustava se stará o rozvod elektrické energie z elektrických stanic z přenosové soustavy k odběratelům. Městské sítě jsou součástí distribuční soustavy, a proto jsou na ni kladeny stejně vysoké požadavky jako na distribuční sítě, které vychází z hlavního cíle elektrizační soustavy, kdy je důležité dbát na hospodárnost a garantovat odběratelům elektrické energie dodávku elektrické energie v potřebném množství, v požadovaném čase, místě, kvalitě a spolehlivosti dodávky.[7]

4.1 Kvalita elektrické energie

Kmitočet z hlediska distribuční soustavy nelze ovlivnit, jelikož je kmitočet dán zdroji elektrické energie umístěnými v přenosové soustavě, kdy se při změně frekvence mění jalový i činný výkon v celé elektrizační soustavě. Nejčastěji se používá automatická regulace kmitočtu pomocí bloků regulačních elektráren, které musí mít velké regulační pásmo a musí být dostatečně pružné při změnách. [7] [9]

Spotřebiče v distribuční síti mají být připojeny přibližně na jmenovité napětí, na které jsou navrženy. Pokud je napětí v síti vyšší, než dovolené tak jsou způsobeny větší ztráty v síti a je také snížena životnost a bezpečnost elektrických zařízení. Pokud je napětí v síti menší, než je dovoleno tak jsou sice ztráty menší, protože spotřebič je zatěžován menším proudem a tím pádem je také snižován i výkon daného spotřebiče. [7] [9]

Nízké napětí se může projevat špatnou svítivostí nebo delším vařením či ohřevem vody. V síti nízkého napětí je dovolená odchylka napětí $\pm 5\%$, kterou je důležité dodržovat. Distribuční soustava, narozdíl od frekvence, dokáže regulovat napětí, při odchylce od jmenovitých hodnot za pomoci regulačních transformátorů nebo i přenastavením odboček u neregulačních transformátorů. Správným výběrem transformátoru lze hodně přispět ke zlepšení napěťových poměrů, čímž lze zlepšit i ztráty v přenosové soustavě. Odchylky napětí v distribuční soustavě mohou vzniknout provozním režimem v přenosové soustavě nebo distribuční soustavě jako úbytek napětí na vedeních, reaktorech, transformátorech a podobně. Záleží na velikosti sítě, průřezu vedení, umístění napáječů, typu spotřebičů a způsobu provozu. [7] [9]

$$\bar{U}_{1f} = \bar{U}_{2F} - \Delta\bar{U}_F = \bar{U}_{2F} + \bar{Z} \cdot \bar{I} = \bar{U}_{2F} + (R + jX) \cdot (I \cdot \cos\varphi \pm jI \cdot \sin\varphi)$$

Při praktických výpočtech se zanedbává jalová složka úbytku napětí a pro lze napsat:

$$\Delta\bar{U}_F = R \cdot I \cos\varphi + X \cdot I \sin\varphi$$

4.2 Spolehlivost dodávky elektrické energie

Spolehlivost dodávky je myšlena jako omezení výpadků elektrické energie na minimum, kdy například jsou někteří odběratelé zařazeni do 1. stupně dodávky elektrické energie a nesmí u nich dojít výpadku z důvodu vzniku velkých škod nebo ohrožení lidských životů. [7]

Spolehlivost dodávky lze ovlivnit:

- Napojením do dvou a více na sobě nezávislých rozvodů.
- Volbou rozvodů s více přípojnicemi
- Zařazením automatů opětovného zapínání pro zajištění okamžitého obnovení napětí v síti při výpadku
- Volbou kvalitních zařízení s minimální pravděpodobností výskytu poruchy.
- Paralelním chodem transformátorů.
- Napojením z více uzlů z přenosové soustavy

4.3 Zásady pro zabezpečení dodávky elektrické energie

Důležitou úlohu při řešení rozvodné soustavy, zvláště při návrhu schématu rozvodu, má stupeň dodávky el. energie, do něž je začleněn závod nebo jeho část. Norma ČSN 341 610 stanovuje obecné zásady pro zabezpečení dodávky jednotlivých stupňů důležitosti, které se rozlišují 3 stupně důležitosti:

1. Stupeň – jedná se o nejvyšší normalizovaný stupeň zajištěnosti dodávky u nás. Můžeme zde zařadit provozovny nebo závody u kterých by mělo přerušení dodávky za následek ohrožení životů či velké národně hospodářské škody. Jako příklad můžeme uvést výrobu umělých vláken, čerpání a větrání v dolech, dochlazování jaderných reaktorů nebo některé hutní provozovny. Každý požadavek na nové zařazení musí být důkladně zdůvodněn.
2. Stupeň – v tomto stupni můžeme hledat provozovny u kterých můžeme připustit zásadnější omezení výroby při přerušení dodávky el. energie. Musí se ovšem dát pozor, aby nedošlo k ohrožení lidských životů. Do tohoto stupně můžeme zařadit velkou část průmyslových provozů, jelikož je značně široký.
3. Stupeň – do tohoto stupně zařazujeme provozy, ve kterých není nutno, aby dodávky el. energie byly zajištěny zvláštními opatřeními.

Zabezpečení dodávky 1. Stupně

Dodávky el. energie v tomto stupni musí být zajištěny za každých okolností. Je nutno, aby byly zajištěny ze dvou na sobě nezávislých napájecích zdrojů. Každý zdroj musí mít takový výkon, aby stačil pokrýt dodávky 1. stupně sám. V případě poruchy na jakékoliv napájecí soustavě, musí dojít k její signalizaci.

Podle technologických podmínek se přepnutí na druhý napájecí zdroj provádí buď automaticky nebo zásahem obsluhy, která má předem stanovený postup spínání.

V případě menších výkonů, můžeme jako druhý napájecí zdroj použít soustrojí se spalovacími motory nebo akumulátorové baterie. Může být použit také náhradní neelektrický pohon příslušného zařízení. Pokud dojde k vypnutí jednoho zdroje a nezpůsobí to zároveň vypnutí zdroje druhého, jsou tyto zdroje nezávislé. Přerušení při samočinném opětovném zapínání nepovažujeme za toto vypnutí.

Zabezpečení dodávky 2. Stupně

Aby byla zajištěna vzájemná záloha, musí se dobře navolit počet napaječů, počty a výkony transformátorů a dělení přípojnic ve stanicích. Jako dostačující se ve většině případů považuje připojení minimálně na dva transformátory anebo přívody dimenzované tak, že při výpadku jednoho transformátoru či přívodu, musí spotřebu 2. stupně pokrýt zbylé transformátory. Při vypnutí jednoho zdroje, dojde k přepnutí na druhý napájecí zdroj zásahem obsluhy podle předem stanoveného postupu spínání, který je vypracován pro havarijní stavy. Když dojde k takovémuto přepínání, může krátkodobě připustit možnost vyšších zkratových poměrů, než na které je zařízení dimenzováno.

Zabezpečení dodávky 3. Stupně

V tomto stupni se dodávky zajišťují připojením na jediný zdroj a není nutno dalšího zvláštního zajištění.

4.4 Možnost snadného rozšiřování zařízení

S rostoucím odběrem elektrické energie a zásobovanou oblastí je důležité při návrhu uvažovat s dalším potencialem rozšířením, a to napojením na další objekty či rozvodné sítě, převedení na vyšší napětí, instalace kabelů s vyšším průřezem nebo mít dostatečnou rezervu pro instalaci dalšího transformátoru. Při vyhodnocování možných řešení sítě je toto jedno z důležitých kritérií, jenž je posuzováno. [7]

4.5 Přehlednost distribuční sítě

Důraz na přehlednost sítě je především z důvodu snadné obsluhy a údržby elektrického zařízení, díky které by měla být vyšší bezpečnost a také zamezeno chybám při obsluze a údržbě. Je v tomto také obsaženo užívání méně počtu zařízení VN a NN, méně typu průřezů, čímž je následně zajištěn snazší servis při poruše, kdy při dobré přehlednosti sítě je může být také chyba rychle odhalena. [7]

4.6 Ekonomický provoz sítě

Distribuční soustava by měla dovolit hospodárný provoz odlišných provozních stavech jako jsou provoz při malém zatížení, provoz při velkém zatížení, proměnlivý účinník při odběru a podobně. Je důležité,

aby se dosáhlo, co největší minimalizace jalových a činných ztrát v distribuční síti, což jde ovlivnit uspořádáním sítě, optimálním dělením počtem trafostanic v provozu anebo například kompenzací spotřebičů pomocí regulace.[7]

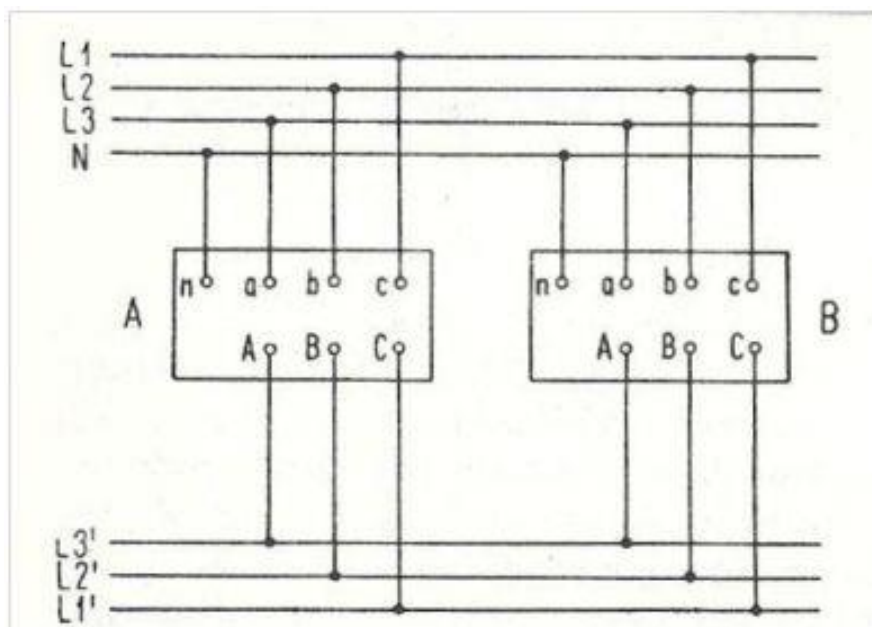
4.7 Ekonomický návrh sítě

Kvalitu elektrické energie, spolehlivost dodávky, možnost snadného rozšiřování, přehlednost sítě a ekonomický provoz sítě je důležité zajistit při návrhu sítě s co nejvyšší kvalitou, ale zároveň s co nejmenšími nutnými investicemi, což není snadné, a proto je důležité provádět při návrhu kompromis. Ekonomický návrh městské sítě zahrnuje počet stupňů napětí, počet transformátoroven, počet transformátorů, průřezy vedení, schémata stanic. [7]

5. Paralelně provozované transformátory

Paralelní chod transformátorů nastává tehdy, jsou-li provozovány dva a více transformátorů najednou na společné síti nebo na společné přípojnici. Paralelní chod transformátorů se používá například u mřížových sítí, ke zvýšení přeneseného výkonu nebo při rozšiřování závodu, kdy provozování jednoho transformátoru o výkonu rovném maximálnímu zatížení by bylo technicky ale i ekonomicky nevýhodné. Z provozního hlediska je výhodnější používat několik transformátorů s menším výkonem než jeden transformátor s velkým výkonem. Při větším počtu transformátorů se zvyšuje spolehlivost dodávky elektrické energie a při poruše jednoho transformátoru jsou v záloze další instalované transformátory. V době menšího zatížení, při revizi nebo servisu nebo poruše se může jeden transformátor odpojit, a tím se zmenší ztráty naprázdno. [6] [12] [11]

Paralelní provoz transformátorů může být buď krátkodobý anebo trvalý. Krátkodobý provoz nastává tehdy, když se jeden z transformátorů nachází v odstaveném režimu a zapíná se pouze při poruše či servisu, zatímco druhý transformátor je v provozu. Výhoda krátkodobého provozu je v tom, že nastává velká impedance a tím pádem omezení zkratového proudu a nevýhoda nastává v okamžiku nutného zapnutí transformátoru v okamžiku výpadu druhého transformátoru. Druhý typ paralelního provozu je trvalý provoz, kdy jsou oba transformátory současně v provozu a pokud nastane výpadek jednoho transformátoru, tak druhý je stále v provozu, což je také velká výhoda tohoto provozu. Nevýhoda je menší impedance a tím pádem i větší zkratové proudy.



Obrázek 12 – Paralelně zapojené transformátory [16]

V rozvodnách může být celkové požadované zatížení napájeno vhodným počtem transformátorů standardní velikosti. Pokud dojde k poruše transformátoru v soustavě paralelně zapojených

transformátorů, nedojde k přerušení dodávky elektrické energie pro základní služby. Paralelní provoz snižuje prostorovou kapacitu rozvodny, když připojujeme transformátory standardní velikosti. Pokud bude některý transformátor ze systému vyřazen z provozu kvůli jeho údržbě a kontrole, nebude narušena kontinuita napájení. Pro optimální a správný provoz transformátorů v paralelním chodu, musí být splněny požadavky níže popsané. [18] [6]

5.1 Stejný převod

Na primární i sekundární straně musí být stejná napětí neboli transformátory provozované v paralelním chodu musí mít stejný převod. Při neshodném převodu mezi primárním a sekundárním napětím paralelně provozujících transformátorů je mezi transformátory rozdíl napětí, kvůli kterému je mezi transformátory vyrovnávací proud. I malé rozdíly způsobí velké vyrovnávací proudy mezi transformátory, a proto je důležité, aby tolerance převodu mezi transformátory v paralelním chodu byla $\pm 0,5\%$, čímž bude omezen vyrovnávací proud mezi transformátory na 5 až 10 % jmenovitého proudu nejmenšího výkonu ze spolupracujících transformátorů v síti. [17]

5.2 Hodinový úhel

Transformátory se nesmí společně provozovat, pokud nemají všechny transformátory stejný hodinový úhel z toho důvodu, že při odlišném hodinovém úhlu nastává rozdíl mezi hodnotami napětí na sekundární straně, které vznikají z důvodu velkých vyrovnávacích proudů. Při hodinovém úhlu 6 hodin vzniká největší vyrovnávací proud a na výstupních svorkách transformátoru vzniká až dvojnásobné napětí, ale i při rozdílu hodinového úhlu 1 hodina je rozdíl napětí tak velký, až transformátory protéká vyrovnávací proud 25% jmenovitého proudu. [17]

5.3 Napětí nakrátko

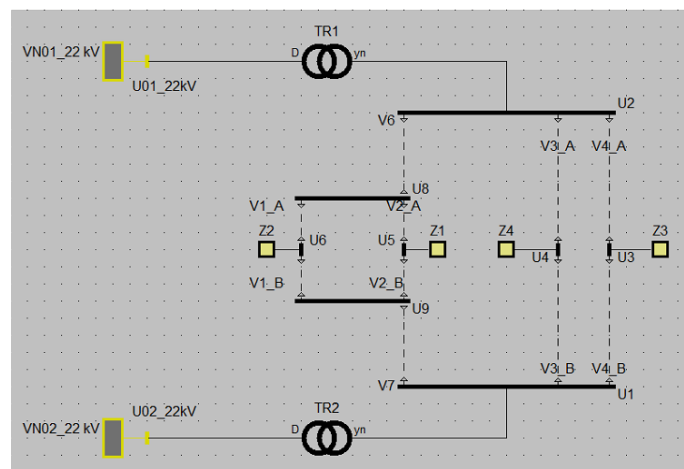
Pokud mají transformátory při paralelním chodu nestejně u_k , tak spolu mohou pracovat, ale budou nerovnoměrně zatíženy ke svým jmenovitým výkonům. Transformátory s větším u_k převezmou menší zatížení, a naopak transformátory s menším u_k převezmou větší zatížení z toho důvodu, že transformátory s menším u_k mají menší odpor. To v důsledku znamená, že následně při zatížení jmenovitým proudem I_n by na transformátoru vznikaly menší úbytky napětí a výstupní napětí by bylo následně vyšší. Aby transformátor s menším u_k nebyl přetížen, nesmí být skupina transformátorů zatížena výkonem rovnému součtu všech transformátorů ve skupině. Z důvodu zatěžování transformátorů ve skupině je podstatné, aby transformátory měly téměř stejné napětí nakrátko u_k . Pokud nemá být transformátor s menším u_k přetížený, tak musí být zatížen pouze jmenovitým výkonem $s_1=1$, tím pádem se bude moci ale následně transformátor s větším u_k zatížit pouze částečně.

Zdánlivý výkon instalovaných transformátorů by měl být přibližně stejný. Aby transformátory měly stejné u_k nejde často splnit, a proto je dovolená odchylka $\pm 10\%$. [17] [20]

$$\frac{S_2}{S_1} = \frac{u_{k1}}{u_{k2}} \Rightarrow S_2 = 1 \cdot \frac{u_{k1}}{u_{k2}} = \frac{u_{k1}}{u_{k2}}$$

5.4 Simulování nesplnění podmínek pro paralelní chod

V této části bude namodelována síť se dvěma transformátory v paralelním chodu a bude se ověřovat, co se stane při nesplnění podmínek pro paralelní chod transformátorů. Pro simulaci byla namodelována síť na obrázku níže, kde se nachází dva napáječe na hladině VN, dva transformátory o výkonu 160 kVA, 10 kabelových vedení a 4 zátěže o celkovém příkonu 115 kVA s účinnkem 0,98.



Obrázek 13 – Model sítě pro simulace nesplnění podmínek pro paralelní chod

Tabulka 2 – Hodnoty transformátorů při splnění podmínek

Název prvku	Uzel	I [A]	α [°]	P [kW]	Q [kVAr]	S [kVA]	Zatížení
TR1	U01_22kV	1,477	-12,794	57,322	12,951	58,767	37%
TR2	U02_22kV	1,477	-12,794	57,322	12,951	58,767	37%

5.4.1 Nesplnění podmínky stejného převodu

Pro simulaci nesplnění podmínky stejného převodu byla na transformátoru TR1 nastavena druhá odbočka, a tak bude na sekundární straně transformátoru napětí 410 V. Další parametry zůstanou nezměněny. Z tabulky níže vyplývá, že transformátor s vyšším napětím, a tedy menším převodovým číslem, což je v tomto případě TR1, je více zatížen, a to až dvojnásobně oproti TR2. Tento stav, i když není ideální, je nicméně schopný provozu, ale ne trvalého provozu a musí být dán do pořádku.

Tabulka 3 – Hodnoty transformátorů při splnění podmínky stejného převodu

	Uzel	I [A]	α [°]	P [kW]	Q [kVAr]	S [kVA]	Zatížení
TR1	U01_22kV	2,249	-26,924	79,78	40,394	89,424	56%
TR2	U02_22kV	0,954	21,366	35,363	-13,873	37,987	24%

5.4.2 Nesplnění podmínky hodinového úhlu

Pro simulaci nesplnění podmínky stejného hodinového úhlu byl na transformátoru TR1 nastaven hodinový úhel 3 a na TR2 byl ponechán hodinový úhel 1. Bylo záměrem nejprve zkusit hodinový úhel 2 na TR1, ale software DNCalc nechtěl tuto simulaci povolit. Z tabulky níže vyplývá, že by takto špatně navržené trafostanice pro paralelní chod, které jsou zatíženy dle výpočtu na více než 800%, měly krátkou životnost destruktivního významu. Dle dalších výpočtů byla všechna kabelová vedení zatížena na více než 100%. Při návrhu paralelního chodu je tedy velice důležité splnit tuto podmínku, jinak by mohlo dojít k vážnému poškození kabeláže a možná i ohrožení na životech. Tento stav nesmí nastat!

Aby mohl nastat provoz s rozdílným hodinovým číslem, tak pouze tehdy, když bude splněna podmínka, a to prohození svorek na sekundárním nebo primárním vinutí, čímž se dosáhne stejného fázového natočení vektorů. Je tedy nezbytné, aby transformátory náležely do shodné kategorie hodinových čísel. Jestliže tento předpoklad nebude splněn, tak paralelní chod transformátorů je nemožný.

Tabulka 4 – Hodnoty transformátorů při nesplnění podmínky hodinového úhlu

	Uzel	I [A]	α [°]	P [kW]	Q [kVAr]	S [kVA]	Zatížení
TR1	U01_22kV	34,488	-107,457	-436,523	1269,295	1342,26	839%
TR2	U02_22kV	36,539	8,117	1413,678	-251,896	1435,945	897%

5.4.3 Nesplnění podmínky stejného u_k

Pro simulaci nesplnění podmínky stejného u_k , byl na transformátoru TR1 nastaveno u_k 4 % a na TR2 bylo ponecháno u_k 6 % dle jmenovitých hodnot. Z tabulky níže se potvrzují teoretické předpoklady a to, že u transformátorů v paralelním provozu s nestejným u_k dochází k nerovnoměrnému zatížení transformátorů, kdy transformátor s menším u_k na sebe převezme větší zatížení. Pokud by se dále zvyšovalo zatížení, tak by došlo k přetížení transformátoru s menším u_k , z čehož vyplývá, že při provozu transformátorů s nestejným u_k nelze využít jejich maximální jmenovitý výkon.

Tabulka 5 – Hodnoty transformátorů při nesplnění podmínky stejného napětí nakrátko

	Uzel	u_k [%]	I [A]	α [°]	P [kW]	Q [kVAr]	S [kVA]	Zatížení
TR1	U01_22kV	4	1,663	-8,607	65,458	9,82	66,191	41%
TR2	U02_22kV	6	1,304	-18,522	49,222	16,443	51,896	32%

6. Hlediska návrhu elektrického vedení

Připojení odběru na elektrizační soustavu obsahuje soubor nutných opatření jak technických, administrativních, tak technickohospodářských, které musí být splněny, aby bylo možné dosáhnout nejvyššího stupně efektivnosti v zásobení elektrickou energií. Jednotlivé odběry mají svá specifika, která jsou daná nejen velikostí požadovaného výkonu a časovým rozložením odběru, ale také požadavky na kvalitu dodávané elektrické energie.

Dají se uvést nejdůležitější hlediska spojená s návrhem:

- Hledisko mechanické pevnosti
- Hledisko oteplení
- Hledisko úbytku napětí
- Hledisko hospodárnosti
- Hledisko bezpečnosti zařízení a bezpečnosti osob
- Hledisko kvality a zabezpečení dodávky elektrické energie
- Hledisko zajištění dodávky

6.1 Hledisko mechanické pevnosti

Minimální průřezy vodičů jsou stanoveny podle mechanické pevnosti. Platí to jak u venkovních, tak i u kabelových vedení. Dle toho, jak jsou kabely uloženy, se zde řadí i otázka izolace vodičů, z které následně vyplývá i podstatné rozhodnutí mezi venkovním a kabelovým vedením. Toto rozhodnutí je převážně dáno ekonomickým hlediskem, přestože např. ve městech je uplatněno i estetické hledisko. U kabelového i venkovního vedení se rozeznávají podmínky při normálním provozu a podmínky při poruchách, kdy jsou jak elektrická zařízení, tak elektrická vedení vystavena zvětšenému mechanickému namáhání.

6.2 Hledisko oteplení

Je nutno, aby průřez vedení byl takový, aby proudové zatížení nevyvolalo nedovolené oteplení vodiče s ohledem na jeho provedení a prostředí, ve kterém je vodič umístěn. U hlediska oteplení se také rozeznávají podmínky normální zatížitelnosti a podmínky při zkratech. V případě zkratu je totiž dovoleno na krátkou dobu zvýšené oteplení, které je přípustné i při přetížení asi 1 až 2 hodiny, než se vyčlení vadný kousek a přepne zatížení.

6.3 Hledisko úbytku napětí

Toto hledisko je značně důležité pro dimenzování elektrických vedení. Nezbytným doprovodným jevem při zásobení elektrickou energií je úbytek napětí na napájecím vedení anebo přívodu ke spotřebiči. Velikost dovoleného úbytku napětí je samozřejmě rozdílná jak v jednotlivých napěťových stupních, tak i při konkrétním jmenovitém napětí podle druhu, charakteru a důležitosti zásobených spotřebičů. Je nutno, aby vymezený úbytek napětí přirozeně dovozoval zdárný provoz zásobeného zařízení a také byl ve shodě s ostatními hledisky návrhu. Velikost úbytku napětí je těsně spojena s možností regulace napětí, s rozsahem regulace napětí a elektrické vzdálenosti místa odběru od tohoto regulačního zařízení.

6.4 Hledisko hospodárnosti

Pojímá obzvláště vhodnou volbu proudové soustavy a volbu velikosti napětí pro žádaný přenášený výkon, pro napájení daného spotřebiče. Dále se zde řadí stanovení ztrát výkonu nebo kontrola průřezu z přípuštěné ztráty výkonu, rozbor všech činitelů ovlivňujících ztráty ve vedení a opatření na jejich zmenšení a též otázka kompenzace nesymetrie a omezení výskytu vyšších harmonických. Záležitosti hospodárnosti obsahují výpočet hospodárného průřezu, hospodárné proudové hustoty, jejíž exaktní uplatnění vyžaduje komplexnější posouzení. Některé otázky hospodárnosti nelze řešit v určité uzavřené samostatnosti, protože se dotýkají problémů celé elektrizační soustavy. Je zde řazeno celkové posouzení návrhů provedených dle ostatních hledisek, s uvážením investičních nákladů a nákladů provozních.

6.5 Hledisko bezpečnosti zařízení a bezpečnosti osob

Obsahuje zejména soubor opatření za účelem dosažení úspěšného provozu celého zařízení, rovněž jistění zařízení před nadproudy a zkraty. Řadí se zde také ochrana před přepětím jak samotného vedení, tak zařízení na ně připojených. Nejvýznamnějším požadavkem na instalaci a provoz elektrických zařízení je bezpečnost obsluhujících osob a osob, které přichází do styku s těmito zařízeními. Každý projekt elektrického zařízení musí obsahovat návrh ochrany před nebezpečným dotykem, s tím souvisí také provedení uzemnění v navrhovaném zařízení.

6.6 Hledisko kvality a zabezpečení dodávky elektrické energie

Jakýkoliv spotřebič elektrické energie je sestaven pro určité napětí. Každá změna napětí pak vede ke zhoršení jeho provozu. Je skoro nemožné udržet stálé napětí na svorkách spotřebiče, ale je zapotřebí, aby tyto změny napětí nebyly tak veliké, aby to škodlivě působilo na správný chod spotřebiče, jeho životnost nebo u světelných spotřebičů na jejich uživatele. Pod kvalitou elektrické energie si lze

představit vlastnosti napětí a kmitočtu rozlišené podle spotřebičů, také jejich připojení na jednofázovou nebo trojfázovou soustavu s uvážením i její možné nesymetrie. Kvalita žádá splnění mezí přípustných změn velikostí napětí a kmitočtu, dále dodržení mezí přípustného obsahu vyšších harmonických a dodržení mezí přípustné nesymetrie trojfázové soustavy.

6.7 Hledisko zajištění dodávky

Toto hledisko se uplatňuje už při návrhu. Sleduje, s jakou zabezpečeností je třeba zajistit požadovaný odběr podle jeho charakteru a podle stupně důležitosti odběru v celém souboru odběratelů elektrické energie. Zaopatřenost dodávky elektrické energie požaduje analýzu poruchovosti všech elementů rozvodu, rozbor provozní bezpečnosti a následně vyvození z této analýzy závěrů, zda dané řešení splňuje tyto předpoklady nebo zda je potřeba dále provést nějaká přídatná opatření. Je nutné, aby bylo sledováno i ekonomické hledisko, jak velké náklady navíc je třeba vynaložit, aby bylo dosaženo požadovaných parametrů.

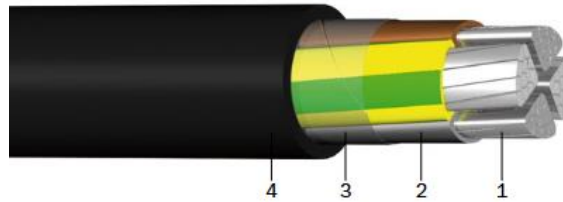
6.8 Kabelová vedení

Na hladině nízkého napětí se nejčastěji používají kabelová vedení a nachází využití v případech, kdy není možné z prostorových, bezpečnostních případně jiných důvodů použít vedení venkovní. Kupní náklady kabelových vedení jsou na rozdíl od venkovních vedení výrazně vyšší. Vedení se jmenovitým napětím 0,4 kV slouží k rozvodu elektrické energie od transformátorů 22/0,4 kV až k odběrateli. [2]

Závěsná kabelová vedení se instalují místo starších čtyř vodičových nadzemních kabelových neizolovaných rozvodů, ale také hlavně na okrajích vesnic a měst. Kabely závěsného provedení se skládají standardně z jádra s hliníkovými izolovanými žilami, ale může být i v provedení s měděnými izolovanými žilami. Všechny žíly jsou společně zality do pláště z PVC. Podzemní kabelová vedení se často užívají v městských aglomeracích k rozvodu vysokého i nízkého napětí. Další přednost je nepřítomnost vedení a drátů v ulicích, což zlepšuje bezpečnost a spolehlivost. [5] [3]

Díky instalaci podzemních vedení také odpadá dodržování ochranných pásem nadzemních vedení, která jsou větší než u podzemního vedení u pokládky kabelů pod cesty nebo chodníky. Nízkonapěťové sítě se ve městech postupně díky svým výhodám převádí na mřížovou topologii. Kabely se skládají z tří žil pro fáze a dále je jedna žíla určena pro uzemnění. Jádro vodiče bývá chráněno izolací z PVC, které je obarvené podle typu žíly, a to hnědá, černá a šedá pro fázi a žlutozelená pro uzemnění. Mezi izolací a pláštěm je výplňový obal. Kabelová vedení se mohou dále používat s různou izolací a stíněním. Mají menší indukční reaktanci, jalové ztráty a úbytek napětí než venkovní vedení, ale disponují větší kapacitní reaktancí než venkovní vedení. Vyskytuje se při jejich provozu méně poruch než u

venkovního vedení, ale tím, že jsou umístěny v zemi, tak se místa poruchy náročně vyhledávají a následně opravují.[5] [3]



Obrázek 14 – Silový kabel AYKY [27]

1. Al jádro
2. Izolace z PVC, žíly jsou stočené do duše kabelu
3. Obal z plastové pásky nebo výplňové gumy
4. Plášť z PVC černý, odolný proti UV záření

Kabely jsou určeny pro rozvod elektrické energie v pevném uložení do země, kabelových kanálů a ve vnějším prostředí. V rámci této diplomové práce jsou použity následující typy kabelů:

- AYKY 3x 240 + 120
- AYKY 3x 120 + 70
- AYKY 3 x 95 + 70
- AYKY 3x 70 + 50

7. Návrh mřížové sítě ve městě Klatovy

7.1 Stávající stav

Ve stávajícím stavu se ve městě Klatovy v blíže neurčené části provozuje 5 distribučních stanic z celkově 6 distribučními transformátory, které napájejí 6 paprskových sítí, přičemž každá z těchto sítí má svůj transformátor o výkonu 400 kVA. Tři transformátory jsou napájeny z jednoho napájecího vedení VN0001 na hladině 22 kV a další tři transformátory jsou napájeny z druhého napáječe VN0002 také na hladině 22 kV. Napájení napáječů VN0001 a VN0002 není na sobě závislé a napáječe jsou tedy napájeny ze dvou na sobě nezávislých sítí. V rámci diplomové práce bude simulován i stávající stav paprskové sítě, aby bylo možné posoudit, zda dojde ke zlepšení parametrů po přechodu na mřížovou síť.

7.2 Výpočty navržené mřížové sítě v městě Klatovy

Ve stávajícím stavu se v části městské sítě ve městě Klatovy nachází šest paprskových sítí, které rámci simulace praktické části této diplomové práce mají propojit, a tak nechat vzniknout mřížovou síť se šesti transformátory, které budou napájeny dvěma napáječi VN. Pro správný návrh je tedy důležité, aby navržená síť prošla několika simulacemi, a to jak v ustáleném bezporuchovém stavu, tak také v poruchových stavech, aby se získaly informace o tom, jak se bude mřížová síť při jednotlivých stavech chovat a díky výsledkům, popřípadě mohly být navrženy úpravy. V rámci simulací budou sledovány jednotlivé napěťové poměry v uzlech, proudové zatěžování kabelů, toky výkonu a zatěžování transformátorů. Je tedy důležité navrženou síť vhodně nasimulovat ve výpočtovém programu DNCalc z hlediska různých provozních stavů. V rámci této diplomové práce se bude jednat o následující provozní stavy:

- Ustálený bezporuchový stav stávající paprskové sítě
- Ustálený bezporuchový stav nově navržené mřížové sítě
- Výpadek VN napáječe VN0001
- Výpadek VN napáječe VN0002

Program DNCalc je prostředkem pro modelování vlivu připojovaných zařízení na úroveň a změnu pozorovaných parametrů kvality v sítích VVN, VN a NN. V tomto softwaru jsou využity výpočetní metody vycházející z norem ČSN IEC 1000-2-2, ČSN EN 61000-3-2, ČSN EN 60909-1, ČSN EN 50160, PNE 33 3430 a také z předpisu Pravidel provozování distribučních soustav. Program DNCalc je prostředkem pro modelování vlivu připojovaných zařízení na úroveň a změnu sledovaných parametrů kvality v sítích NN, VN a VVN.

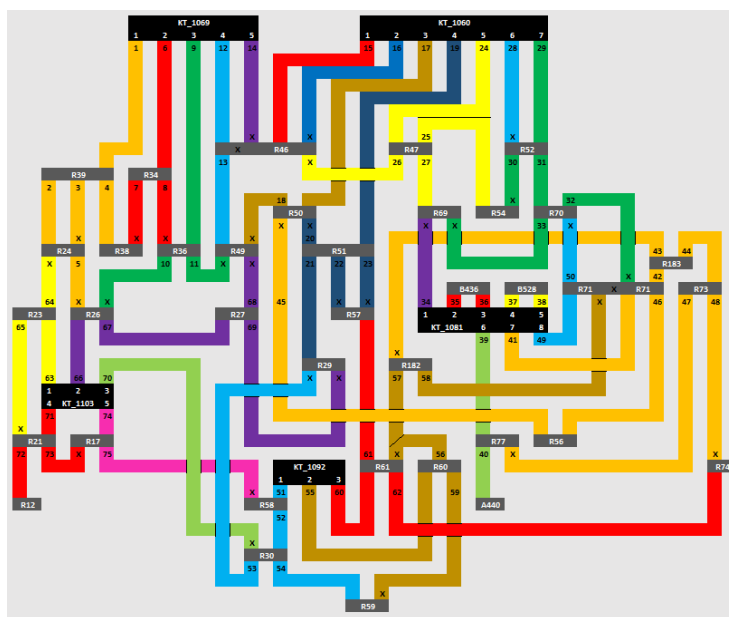
Software DNCalc je nástupce úspěšného programu E-Vlivy, kdy jsou v něm zachovány výpočetní rozsahy a nově je možné provádět adekvátní modelování trojfázových soustav a výpočty v elektrizační soustavě. Knihovna softwaru DNCalc byla rozšířena o vybrané prvky OZE a Smart Grid. Jsou v něm nově také využity markantně rozšířené nástroje pro správu sítě, detailnější zadávání parametrů prvků, přehledné výpisy hodnot ze simulací včetně požadavků na zpětné vlivy zařízení připojovaných k DS. Program DNCalc poskytuje uživateli řadu nástrojů a speciálních metod pro posuzování úrovně zpětných vlivů v distribučních sítích a posouzení připojitelnosti zařízení k DS, úrovně kvality elektřiny a dalších provozních parametrů nezbytných pro ověření provozu, ale i návrh rozvoje DS. [26]

7.3 Výpočetní metoda

Chod sítě je jedním ze základních typů výpočtů elektrických sítí. V programu DNCalc jsou implementovány tři výpočetní metody chodu sítě:

- Newtonova iterační metoda (výchozí)
- Metoda uzlových napětí
- Gauss-Seidlova výpočetní metoda

Implicitní výpočetní metodou pro chod sítě je Newtonova iterační metoda, jejíž výhodou je poměrně malý počet iteračních kroků nutných k dosažení požadované přesnosti výsledků, samozřejmě za podmínek, které umožňují konvergenci výpočetní metody. Pro výpočet chodu sítě metodou uzlových napětí jsou implementovány iterační postupy, které umožňují analyzovat napěťové poměry při zachování zadaných hodnot výkonu.



Obrázek 15 – Zjednodušený model mřížové sítě v ustáleném stavu

7.3.1 Předpoklady pro simulaci

Z důvodu velkého rozsahu sítě byla síť namodelována v jednodušším tvaru, avšak takovým způsobem, aby vypočtené hodnoty měly vypovídající hodnotu. U žádného výpočtu není uvažováno s přechodovými ději u zátěží, přepínání odboček transformátoru, se zkratky, s údery blesku do vedení a podobně. Dále není v rámci modelu řešena kabelová část vedení VN a je nahrazeno pouze dvěma napájecími uzly VN0001 a VN0002. Dále jsou namodelovány pojistky v rozvaděčích, ale pouze na hlavních vedeních na straně NN, a to konkrétně v rozvaděčích R24, R26, R49, R69, R70, R182 a R74.

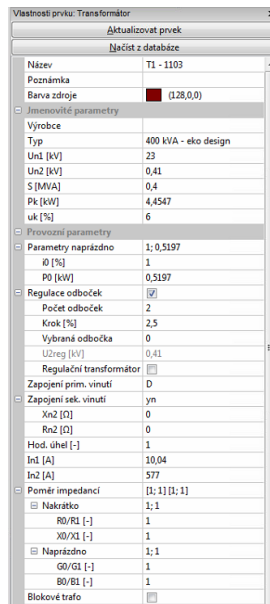
Dále jsou veškeré odběry zapojeny hned na vývodech trafostanic s tím, že tyto odběry jsou vždy součet všech odběrů na dané větvi vývodu z každé trafostanice. V zjednodušeném schématu je implementováno 41 spínačů s označením S1 až S41, které slouží pro spínání vedení v mřížové síti a jsou využita také pro modelování poruchových stavů. Dále bylo ve výpočtovém programu DNCalc nastaveno symetrické proudové zatížení všech fází v celé síti, a proto bude dále uváděn pouze vždy jeden proud ve vložených tabulkách. Na základě zkušeností a dlouhodobého vyhodnocování a sledování maloodběratelů byl s distributorem elektrické energie ČEZ distribuce a.s. doporučen účinník pro všechny zátěže 0,98 induktivní.

7.4 Zadávání parametrů prvků

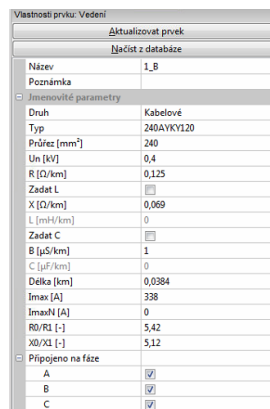
Software DNCalc má přátelské prostředí a síť se v něm snadno modeluje díky přehledné liště prvků, která obsahuje všechny důležité a potřebné prvky pro modelování sítě jako jsou napáječe, trafostanice, vedení, uzly, pojistkové rozpojovací skříně, spínací rozvaděče a podobně. Prvky se dají do modelu vložit pomocí možnosti kreslení nebo pomocí klávesové zkratky.

Vlastnosti prvku: Napájecí uzel	
Aktualizovat prvek	
Načíst z databáze	
Název	VN0001
Poznámka	
Barva zdroje	(0,0,0)
Imenzivní parametry	
Un [kV]	22
Skimax	
Uprov AB [kV]	23
Uhel Uab [°]	30
Uprov BC [kV]	23
Uprov CA [kV]	23
Us [kV]	0
Uhel Us [°]	0
Zadet Iskr	[]
Iskr [kA]	1,04073
Sskr [MVA]	40
Rn [Ω]	0
Xn [Ω]	0
R0/R2 [-]	1
X0/X2 [-]	1
R/X [-]	0,59
Skimin	
Uprov AB [kV]	23
Uhel Uab [°]	30
Uprov BC [kV]	23
Uprov CA [kV]	23
Us [kV]	0
Uhel Us [°]	0
Zadet Iskr	[]
Iskr [kA]	0,944755
Sskr [MVA]	38
Rn [Ω]	0
Xn [Ω]	0
R0/R2 [-]	1
X0/X2 [-]	1
R/X [-]	0,59

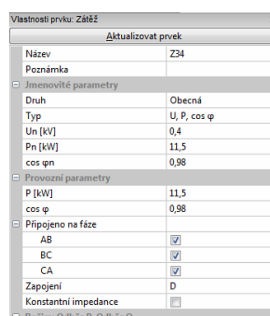
Obrázek 16 – Zadávání parametrů napájecího uzlu pro výpočty ve třífázovém modelu



Obrázek 17 – Zadání parametrů transformátoru pro výpočty v jednofázovém modelu



Obrázek 18 – Zadání parametrů vedení pro výpočty v jednofázovém modelu



Obrázek 19 – Zadání parametrů zátěže pro výpočty v jednofázovém modelu

Pomocí oken výše v tabulce byl zpracovaný celý model sítě. Celkově se model skládá ze 75 vedení, kdy jsou v síti uvažována pouze vedení AYKY, 6 transformátorů o výkonu 400 kVA, 2 napáječů VN a 23 zátěží neboli odběrů ze sítě. Některá vedení v simulaci jsou označena například 51_A a 51_B. Je to z toho důvodu, že na počátku bylo pouze vedení 51, ale po zapojení zátěže Z51 muselo být toto vedení logicky rozděleno, a proto bylo vhodné ho v názvu rozlišit, což se nakonec ukázalo jako dobrá volba při vyhodnocování provozu sítě.

7.5 Prvky v síti a jejich parametry

Na tabulce níže je uveden seznam všech šesti transformátorů zapojených v navržené v síti, přičemž všechny splňují podmínky pro paralelní provoz, to znamená že mají stejný převod 22/0,4 kV, stejný hodinový úhel D/yn a stejné u_k 6%. Všech šest transformátorů má zdánlivý výkon 0,4 MVA a celkový výkon všech transformátorů je 2,4 MVA.

Tabulka 6 – Vypočítané hodnoty pro napáječe

Název	U	S	P_k	u_k	I_0	P_0	Prim.	Sekun.	I_{n1}	I_{n2}
	[kV]	[MVA]	[kW]	[%]	[%]	[kW]			[A]	[A]
1060 – T1	22/0,4	0,4	4,4547	6	1	0,52	D	yn	10,04	577
1069 – T1	22/0,4	0,4	4,4547	6	1	0,52	D	yn	10,04	577
1081 - T1	22/0,4	0,4	4,4547	6	1	0,52	D	yn	10,04	577
1081 - T2	22/0,4	0,4	3,4066	6	1	0,42	D	yn	10,04	577
1103 – T1	22/0,4	0,4	4,4547	6	1	0,52	D	yn	10,04	577
1092 – T1	22/0,4	0,4	3,4066	6	0,4	0,42	D	yn	10,04	577

Na tabulce níže je seznam všech zátěží v modelované síti, kterých je celkově 23. I když je v reálném stavu na jednotlivých vývodech transformátoru několik zátěží, tak pro zjednodušený návrh a následné simulace v rámci diplomové práce byly všechny zátěže na jednotlivých vývodech transformátoru sečteny a modelovány jako jedna zátěž a zapojeny na příslušně výstupy distribučního transformátoru. Momentálně je celková zátěž dle poskytnutých hodnot modelované sítě 537 kW a pro všechny zátěže byl zvolen účinník 0,98 induktivního charakteru.

Odběr elektrické energie se v budoucnosti bude držet stávajícího trendu, a tedy narůstat, a proto bude důležité provést rozšíření a posílení distribuční sítě tak, aby byly zaručeny kladené požadavky na síť jako jsou kvalita dodané elektrické energie odběrateli a mít zajištěnou spolehlivou dodávku elektrické energie v době výpadků jednotlivých transformátorů nebo i napáječů VN.

Tabulka 7 – Odběry na jednotlivých vývodech z trafostanice

DTS_vývod	Zatížení (kW)	DTR	Zatížení DTR (kW)
KT_1060_1	0	KT_1060_T1	118,2
KT_1060_2	0	KT_1060_T1	
KT_1060_3	24,2	KT_1060_T1	
KT_1060_4	41,5	KT_1060_T1	
KT_1060_5	25,1	KT_1060_T1	
KT_1060_6	5,4	KT_1060_T1	
KT_1060_7	22	KT_1060_T1	

KT_1069_1	21,6	KT_1069_T1	68,3
KT_1069_2	28,3	KT_1069_T1	
KT_1069_3	18,4	KT_1069_T1	
KT_1069_4	0	KT_1069_T1	
KT_1069_5	0	KT_1069_T1	
KT_1081_1	11,5	KT_1081_T1	52,4
KT_1081_4	10,5	KT_1081_T1	
KT_1081_5	10,5	KT_1081_T1	
KT_1081_6	19,9	KT_1081_T1	
KT_1081_2	7,3	KT_1081_T2	83,2
KT_1081_3	7,3	KT_1081_T2	
KT_1081_7	56,6	KT_1081_T2	
KT_1081_8	12	KT_1081_T2	
KT_1092_1	56,4	KT_1092_T1	
KT_1092_2	21,9	KT_1092_T1	98,3
KT_1092_3	20	KT_1092_T1	
KT_1103_1	30,7	KT_1103_T2	117,1
KT_1103_2	21,1	KT_1103_T2	
KT_1103_3	0	KT_1103_T2	
KT_1103_4	33,8	KT_1103_T2	
KT_1103_5	31,5	KT_1103_T2	

Na tabulce níže je seznam všech kabelů v navržené mřížové síti. Pro distribuci elektrické energie je využíváno kabelové vedení, které je tvořeno pouze z kabelů AYKY o průřezech 70, 95, 120 a 240 mm², a tedy odpovídá dnes používanému standardu a není tak technicky zastaralé a předpokládá se u nich s dlouhou životností a pokud nebude při modelování zjištěno přetěžování, tak jich bude i nadále využito v nově navržené mřížové síti.

U kabelů je uvažováno s parametrem odporu, reaktance a délky kabelu. Důležitým parametrem v tabulce je také I_{\max} , který charakterizuje maximální zatížení. Tento parametr bude sledován u simulací z důvodu přetížení jednotlivých kabelů jak u ustálených stavů, tak i v případě poruchy. Celková délka kabelového vedení v modelované síti je téměř 8,5 km.

Tabulka 8 – Parametry kabelového vedení v modelované síti

Název	l [km]	R [Ω /km]	X [Ω /km]	Imax [A]
120-AYKY-120	1,07	0,253	0,072	252
120-AYKY-70	3,08	0,253	0,072	253
150-AYKY-150	0,04	0,206	0,071	286
240-AYKY-120	1,98	0,125	0,069	371
70-AYKY-70	0,31	0,443	0,074	186
95-AYKY-70	1,98	0,32	0,073	223

7.6 Modelování sítě ve výchozím stavu

Pro návrh nového zapojení mřížové sítě je důležité provést nejprve simulaci ustáleného bezporuchového stavu ve výchozím stavu sítě, a tedy sítě v paprskovém stavu, kdy bude tato síť napájena dvěma plně funkčními napáječi VN, přičemž nedochází v okamžiku simulace žádná porucha. Napáječe budou napájet celkově 6 transformátorů o jednotkovém výkonu 400 kVA, kdy tyto transformátory nebudou mezi sebou nikde propojeny, díky spínačům a rozpojovacím rozvaděčům umístěných v modelu sítě. Simulaci výchozího stavu sítě je důležité provést pro porovnání proudového zatížení vedení a napěťových poměrů v uzlech a ověřit zatížení transformátorů.

Tabulka 9 – Vypočítané hodnoty pro napáječe

Název prvku	Uzel	I [A]	α [°]	P [kW]	Q [kVAr]	S [kVA]
VN0001	R9574	7,993	165,28	306,7	78,7	316,59
VN0002	R9569	6,138	165,47	235,9	60,06	243,45

Z tabulky výše lze vyčíst, že celkový výkon napáječů je 560 kVA, i když celkový příkon všech zátěží je 548 kVA z toho vyplývá, že 12 kVA je dodáno pro pokrytí ztrát na kabelovém vedení a v transformátorech při převodu napětí.

Tabulka 10 – Vypočítané hodnoty pro transformátory napájené z napáječe VN0001

Název prvku	Uzel	I [A]	α [°]	P [kW]	Q [kVAr]	S [kVA]	Zatížení [%]
T1 - 1069	R9574	1,80	-15,37	69,00	18,55	71,45	17,86
T1 - 1060	R9574	3,11	-14,53	119,24	30,18	123,00	30,75
T1 - 1103	R9574	3,08	-14,53	118,40	29,96	122,13	30,53

Tabulka 11 – Vypočítané hodnoty pro transformátory napájené z napáječe VN0002

Název prvku	Uzel	I [A]	α [°]	P [kW]	Q [kVAr]	S [kVA]	Zatížení [%]
T1-1081	R9569 VN	1,39	-16,06	52,88	14,97	54,96	13,74
T2-1081	R9569 VN	2,19	-14,94	83,85	21,98	86,68	21,67
T1 - 1092	R9569 VN	2,57	-13,36	99,19	23,10	101,84	25,46

Na tabulkách výše se nachází vypočtené hodnoty pro transformátory, napáječe VN a napětí v uzlech v softwaru DNCalc ve stávajícím stavu sítě. Z tabulek lze vyčíst, že transformátory nedosahují shodného zatížení, i když jsou podobného provedení, což je především kvůli rozdílnému zatížení transformátorů, kdy na vývodech jednotlivých transformátorů se nachází vedení různých délek a průřezů, ale především je to kvůli různým velikostem odběru.

Minimální zatížení 14 % má transformátor T1-1081 a maximální zatížení 31 % má transformátor T1-1060 a T1-1103. Zatížení transformátorů se tedy pohybuje od 14% až po 31 % v průměru tedy cca 23 %, což je dobré z důvodu nepostižených transformátorů převzít na sebe zatížení transformátoru například v době pravidelných servisů nebo v době poruchy, tak aby byl zachován nepřetržitý chod mřížové sítě třeba i při výpadku transformátoru. Dále jsou tyto hodnoty dobré i z důvodu budoucího rozšiřování a zvyšování výkonů

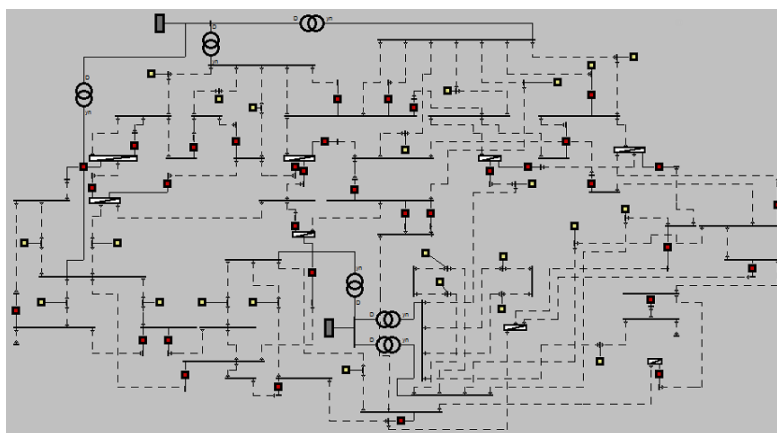
Tabulka 12 – Velikosti napětí a úbytku napětí v uzlech sítě

Název prvku	U [kV]	α [°]	dUn [%]
B436	0,411	-0,95	-2,78
B528	0,412	-0,682	-2,914
RZ35	0,411	-0,95	-2,78
RZ36	0,411	-0,95	-2,78
RZ37	0,412	-0,682	-2,915
RZ38	0,412	-0,682	-2,913
RZ34	0,411	-0,683	-2,789
RZ49	0,411	-0,961	-2,75
R46.1	0,411	-0,891	-2,705
R71.2	0,411	-0,961	-2,75
R14.1	0,411	-0,891	-2,705
R17	0,406	-1,311	-1,577
RZ74	0,406	-1,311	-1,577

Největší zatížení v paprskové síti v ustáleném stavu nastává na vedení označeném 51_B, které je tvořeno kabelem typu 120AYKY70, jenž má $I_{max} = 245$ A. Nastává zde zatížení 33,3 %, což je 82,1 A. Všechny ostatní kabely v paprskové síti jsou zatíženy na méně než 30%.

Z vypočítaných hodnot softwarem lze pozorovat v tabulce výše velikosti napětí a úbytky napětí. Pro velké množství uzlů byly vybrány pouze uzly, které dosahovaly vyšších nebo nižších hodnot oproti ostatním průměrným vypočteným hodnotám. Při nahlédnutí do modelu sítě je vidět, že úbytky napětí se nachází na vzdálenějších místech od trafostanic, což je zapříčiněno rostoucí vzdáleností uzlu.

Hodnoty úbytku napětí se záporným znaménkem představují, že vypočtené hodnoty v uzlech jsou vztaženy ke jmenovitým hodnotám napětí v síti 400 V, a napětí v síti je tedy vyšší než jmenovité. Jelikož napětí na primární straně je udržováno na 23 kV, tedy i výstupní napětí bude na sekundární straně o převod 22/0,4 kV. O něco nižší napětí na sekundární straně je dáno zatížením sítě NN a úbytku napětí na transformátoru, a tak pro vypočtené úbytky napětí vzniká rezerva a jsou tak předepsané hodnoty napětí dle normy ČSN 50 160 dodrženy.



Obrázek 20 – Model sítě v softwaru DNCalc

7.6.1 Modelování paprskové sítě s navýšením spotřeby o 100%

Ve stávajícím stavu obsahuje paprsková síť zátěž o celkovém příkonu 537,5 kW, kdy bylo v kapitole výše ověřeno, že stávající zátěž by nebyla pro paprskovou síť problémem. Úbytky napětí na kabelech nepřesahuje 5% a kabely nejsou přetěžovány. V rámci rozvoje sítě je v této části modelováno, jak se bude síť chovat, když se zvedne zátěž o 100% na celkových 1 075 kW. Všechny ostatní parametry sítě zůstanou zachovány.

Na tabulkách níže lze vidět, že transformátory mají celkový výkon 1 095 kVA, a že se transformátory přetěžují ve třech případech a tím pádem transformátory T1 – 1060, T1 – 1103 a T1 – 1092 nesplňují provozní kritérium mřížové sítě o zatíženosti transformátorů od 25 % až 50 % jmenovitého výkonu. Pokud by tedy docházelo k navyšování výkonu v paprskové síti, tak bude důležité dbát na to, aby nedocházelo k přetěžování transformátorů, jelikož se ale jednalo o simulaci navýšení 100% zátěže, tak je zde dostatečná rezerva, a to především u transformátorů T1 – 1069 a T1-1081.

Tabulka 13 – Zatížení transformátorů při zvýšení spotřeby o 100% v paprskové síti

Název prvku	Uzel	I [A]	α [°]	P [kW]	Q [kVar]	S [kVA]	Zatížení [%]
T1 - 1069	R9574	3,61	-14,77	137,89	34,72	142,19	35,55
T1 - 1060	R9574	5,62	-14,88	214,46	54,45	221,26	55,32
T1 - 1103	R9574	6,23	-14,97	237,96	60,81	245,60	61,40

Tabulka 14 – Zatížení transformátorů při zvýšení spotřeby o 100% v paprskové síti

Název prvku	Uzel	I [A]	α [°]	P [kW]	Q [kVAr]	S [kVA]	Zatížení [%]
T1-1081	R9569 VN	2,76	-14,81	105,60	26,91	108,98	27,24
T2-1081	R9569 VN	4,38	-14,67	167,78	42,34	173,04	43,26
T1 - 1092	R9569 VN	5,17	-14,11	198,50	48,03	204,23	51,06

Tabulka 15 – Zatížení napáječů při zvýšení spotřeby o 100% v paprskové síti

Název prvku	Uzel	I [A]	α [°]	P [kW]	Q [kVAr]	S [kVA]
VN0001	R9574 VN	15,46	165,11	590,30	-149,98	609,06
VN0002	R9569 VN	12,31	165,53	471,88	-117,28	486,24

7.7 Modelování nové mřížové sítě

Pro návrh nové mřížové sítě je důležité provést nejprve simulaci ustáleného bezporuchového stavu ve výchozím stavu sítě, kdy bude tato síť napájena dvěma plně funkčními napáječi VN, přičemž nedochází v okamžiku simulace žádná porucha. Napáječe budou napájet celkově 6 transformátorů o jednotkovém výkonu 400 kVA, kdy tyto transformátory budou mezi sebou propojeny díky spínačům umístěným v modelu sítě S38, S12, S33, S34, S19, S18, S41, S27, S32 a S24. Bude důležité porovnat proudové zatížení vedení a napěťové poměry v uzlech a ověřit zatížení transformátorů.

Tabulka 16 – Vypočítané hodnoty pro napáječe v mřížové síti v bezporuchovém stavu

Název prvku	Uzel	I [A]	α [°]	P [kW]	Q [kVAr]	S [kVA]
VN0001	R9574 VN	7,60	163,65	289,38	83,22	301,11
VN0002	R9569 VN	6,54	167,42	253,26	55,23	259,21

Z tabulky výše lze vyčíst, že celkový výkon napáječů je 560 kVA, tak jako tomu bylo i u paprskové sítě, jen zde dochází k rozdílu, kdy napáječ VN0001 dodává do sítě o 15 kVA méně a napáječ VN0002 dodává do sítě o 15 kVA více. Stejně jako u paprskové sítě je zde dodáváno 12 kVA pokrytí ztrát.

Minimální zatížení 15 % má opět transformátor T1-1081 a maximální zatížení 27 % má transformátor T1-1103. Zatížení transformátorů v mřížové síti se pohybuje oproti paprskové síti v menším rozptylu od 15% až po 27 %, kdy jako v předchozím případě v paprskové síti jsou transformátory méně zatížené a modelovaná síť je tedy připravena na budoucí možné rozšiřování a na zvyšování nároků na rostoucí zatížení.

Tabulka 17 – Vypočítané hodnoty pro transformátory napájené z napáječe VN001 v mřížové síti v bezporuchovém stavu

Název prvku	Uzel	I [A]	α [°]	P [kW]	Q [kVAr]	S [kVA]	Zatížení [%]
T1 - 1069	R9574	2,32	-12,09	89,94	18,77	91,88	22,97
T1 - 1060	R9574	2,53	-18,84	95,16	31,91	100,37	25,09
T1 - 1103	R9574	2,76	-17,63	104,28	32,54	109,24	27,31

Tabulka 18 – Vypočítané hodnoty pro transformátory napájené z napáječe VN0002 v mřížové síti v bezporuchovém stavu

Název prvku	Uzel	I [A]	α [°]	P [kW]	Q [kVAr]	S [kVA]	Zatížení [%]
T1-1081	R9569	1,60	-7,44	62,94	7,91	63,43	15,86
T2-1081	R9569	2,40	-14,43	92,28	23,26	95,16	23,79
T1 - 1092	R9569	2,55	-14,06	98,05	24,06	100,96	25,24

Největší zatížení v mřížové síti v ustáleném stavu nastává opět na vedení označeném 51_B, které je tvořeno kabelem typu 120AYKY70, jenž má $I_{max} = 245$ A. Nastává zde menší zatížení oproti paprskové síti a to zatížení 32 %, což je 80 A. Všechny ostatní kabely v mřížové síti jsou zatíženy na méně než 25%.

Z tabulky níže při porovnání s hodnotami z paprskové sítě se potvrzují teoretické znalosti o úbytku napětí v síti a to, že při propojení paprskové sítě do sítě mřížové se díky napájením z více stran zmenší úbytky napětí v síti. Z vypočítaných hodnot softwarem lze pozorovat v tabulce výše velikosti napětí a úbytky napětí. Pro velké množství uzlů byly vybrány pouze uzly, které dosahovaly vyšších nebo nižších hodnot oproti ostatním průměrným vypočteným hodnotám. Při nahlédnutí do modelu sítě vidět, že úbytky napětí se nachází na vzdálenějších místech od trafostanic, což je zapříčiněno rostoucí vzdáleností uzlu.

Tabulka 19 – Vypočítané hodnoty pro transformátory napájené z napáječe VN0002 v mřížové síti v bezporuchovém stavu

Název prvku	U [kV]	α [°]	dUn [%]
B436	0,411	-1,047	-2,73
B528	0,412	-0,804	-2,98
RZ35	0,411	-1,047	-2,73
RZ36	0,411	-1,047	-2,73
RZ37	0,412	-0,804	-2,98
RZ38	0,412	-0,804	-2,98
RZ34	0,411	-0,873	-2,75
RZ49	0,411	-1,063	-2,66
R46.1	0,41	-1,078	-2,53

R71.2	0,41	-1,068	-2,62
R14.1	0,411	-1,046	-2,66
R17	0,406	-1,16	-1,59
RZ74	0,406	-1,16	-1,59

Tabulka 20 – Porovnání zatížení transformátorů v mřížové síti vs. paprskové síti

Mřížová síť				Paprsková síť			
Název prvku	I [A]	S [kVA]	Zatížení [%]	Název prvku	I [A]	S [kVA]	Zatížení [%]
T1 - 1069	2,319	91,876	22,969	T1 - 1069	1,804	71,453	17,86325
T1 - 1060	2,534	100,37	25,093	T1 - 1060	3,105	122,999	30,74975
T1 - 1103	2,758	109,24	27,309	T1 - 1103	3,083	122,129	30,53225
T1-1081	1,599	63,43	15,8575	T1-1081	1,386	54,958	13,7395
T2-1081	2,4	95,162	23,7905	T2-1081	2,186	86,684	21,671
T1 - 1092	2,546	100,96	25,2398	T1 - 1092	2,568	101,843	25,46075

7.7.1 Modelování mřížové sítě s navýšením spotřeby o 100%

Ve stávajícím stavu obsahuje paprsková síť zátěž o celkovém příkonu 537,5 kW, kdy bylo v kapitole výše ověřeno, že stávající zátěž by nebyla pro paprskovou síť problém, a to ani pro nově navrženou mřížovou síť. V rámci rozvoje sítě je v této části modelováno, jak se bude síť chovat, když se zvedne zátěž o 100% na celkových 1 075 kW. Všechny ostatní parametry sítě zůstanou zachovány.

Na tabulkách níže lze vidět, že transformátory mají celkový výkon 1 095 kVA, a že se transformátory přetěžují ve třech případech, a tak transformátory T1 – 1060, T1 – 1103 a T1 – 1092 nesplňují provozní kritérium mřížové sítě o zatíženosti transformátorů od 25 % až 50 %, jmenovitého výkonu. Pokud by tedy docházelo k navýšování výkonu v paprskové síti, tak bude důležité dbát na to, aby nedocházelo k přetěžování transformátorů, jelikož se ale jednalo o simulaci navýšení 100% zátěže tak je zde dostatečná rezerva, a to především u transformátorů T1 – 1069 a T1-1081.

Tabulka 21 – Zatížení transformátorů při zvýšení spotřeby o 100% v mřížové síti

Název prvku	Uzel	I [A]	α [°]	P [kW]	Q [kVAr]	S [kVA]	Zatížení [%]
T1 - 1069	R9574	4,55	-11,85	175,65	34,95	179,09	44,77
T1 - 1060	R9574	4,80	-17,50	181,10	55,03	189,27	47,32
T1 - 1103	R9574	5,46	-17,92	205,47	64,07	215,22	53,81

Tabulka 22 – Zatížení transformátorů při zvýšení spotřeby o 100% v mřížové síti

Název prvku	Uzel	I [A]	α [°]	P [kW]	Q [kVAr]	S [kVA]	Zatížení [%]
T1-1081	R9569 VN	3,12	-6,85	122,26	13,51	123,01	30,75
T2-1081	R9569 VN	4,75	-14,52	181,99	45,28	187,54	46,88
T1 - 1092	R9569 VN	5,15	-15,82	196,00	53,52	203,17	50,79

Tabulka 23 – Zatížení napáječů při zvýšení spotřeby o 100% v mřížové síti

Název prvku	Uzel	I [A]	α [°]	P [kW]	Q [kVAr]	S [kVA]
VN0001	R9574 VN	14,79	164,08	-562,21	-154,05	582,94
VN0002	R9569 VN	12,99	166,80	-500,25	-112,30	512,70

7.8 Modelování poruchových stavů

Důležitým hlediskem u návrhu NN mřížové sítě je i kritérium N-1, které se pro danou síť zkoumá, kdy hlavním cílem je ověřit situaci v síti v případě, že jeden z objektů v modelované síti bude v poruše neboli mimo provoz. Pro lepší porozumění modelované mřížové sítě je důležité zjistit chování sítě v případě poruchových stavů a zda během nich nedojde k porušení provozních podmínek a jestli v důsledku poruchy bude potřeba například navrhnout posílení vedení nebo změnit topologii sítě. Jako poruchový stav bude simulováno vypnutí jednotlivých napáječů. Poruchové stavy budou vyvolány v softwaru DNCalc funkcí „Pasivovat“ nejprve napáječ VN0001 a v dalším kroku simulace sledování poruchy napáječe VN0002 budou modelovány stavy, kdy dojde k výpadku jednotlivých napáječů VN.

7.8.1 Simulace sítě s výpadkem napáječe VN0001

Jako první bude simulován výpadek napáječe VN0001, který může nastat z důvodu odstávky, a tedy se dá říct, že tento výpadek bude dlouhodobě plánovaný anebo v případě poruchy, kdy v důsledky poruchy dojde k výpadku napáječe VN0001. Tento napáječ napájí transformátory T1-1069, T1-1060 a T1-1103, které budou tedy v případě poruchy odstaveny a síť bude napájena pouze transformátory T1-1081, T2-1081 a T1-1092, které budou napájeny napáječem VN0002. Nejprve bude provedeno simulování stavu, kdy nastane porucha VN0001 a v rámci normálního provozu mřížové sítě budou sepnuté spínače S38, S12, S33, S34, S19, S18, S41, S27, S32 a S24.

Tabulka 24 – Zatížení transformátorů při výpadku napáječe VN0001 bez úpravy sítě

Název prvku	Uzel	I [A]	α [°]	P [kW]	Q [kVAr]	S [kVA]	Zatížení [%]
T1-1081	R9569 VN	3,48	-6,59	136,51	14,31	137,26	34,32
T2-1081	R9569 VN	5,76	-19,95	214,45	75,30	227,28	56,82
T1 - 1092	R9569 VN	5,543	-14,76	211,85	53,46	218,5	54,62

Tabulka 25 – Zatížení napáječe VN0002 při výpadku napáječe VN0001 bez úpravy sítě

Název prvku	Uzel	I [A]	α [°]	P [kW]	Q [kVAr]	S [kVA]
VN0002	R9569 VN	14,733	165,129	-562,8	-143,084	580,72

Tabulka 26 – Kabely s největším úbytkem při výpadku napáječe VN0001 bez úpravy sítě

Název prvku	U [kV]	α [°]	dUn [%]
R36	0,37	-2,80	6,06
R34	0,37	-2,79	6
RZ71	0,37	-2,91	7
RZ66	0,37	-2,82	6,34
R23	0,37	-2,89	6,89
RZ74	0,36	-2,92	7,77
R21	0,37	-2,91	7
R17	0,36	-2,92	7,77
RZ9	0,376	-2,807	6,063
RZ63	0,372	-2,902	6,988

Z tabulek výše lze vyčíst, že napáječ VN0002 dodává do městské distribuční sítě NN výkon 580 kVA, což je o 20 kVA více než u bezporuchového stavu. Vyšší výkon napáječe je způsoben jednak vyšším zatížením transformátorů, ale hlavně vyšším rozsahem kabelové sítě, na kterých vznikají Joulovy ztráty, které jsou následně pokryty dodáním vyššího výkonu z nadřazené sítě. Zatížení transformátorů je oproti bezporuchovému stavu dvojnásobné, ale díky jejich dostatečnému výkonu dokážou pokrýt ztráty v síti tak i zátěže.

Transformátory jsou průměrně zatíženy na 49%, tudíž je zde ještě rezerva pro vyšší zatížení sítě. Dle normy ČSN 33 0120, která udává maximální povolené úbytky napětí v distribuční síti může při jmenovitém napětí sítě 230 V / 400 V vzniknout maximálně úbytek napětí na distribuční síti 10 %. V tabulce výše jsou hodnoty maximálních úbytku napětí, kde se dosahuje maximálních hodnot okolo 7,7 % úbytku napětí, tudíž dle normy ČSN 33 0120 nejsou překročeny hodnoty úbytku napětí. Pokud by byla potřeba zmenšit hodnoty úbytku napětí v síti pod 5%, tak by toho šlo dosáhnout sepnutím spínačů s označím S21, S29, S32, S17, S43 a S25.

Na kabelovém vedení s označením 51_B teče proud 213 A, což je způsobeno především zátěží Z51 o příkonu 56,4 kW, která je tomto vedení zapojena a zbytek výkonu teče dál do sítě. Vedení je tak zatíženo v tomto úseku až na 86% a není zde tedy téměř žádná rezerva pro přenesení vyššího výkonu. Pokud by nastala porucha na spínači S17, tak by následně musel téct přes kabel 51_B tekl proud až 257 A a byl by zatížen na 104 %, čímž by došlo k jeho poškození a následnému přetížení dalších kabelů,

což by vedlo až k rozpadu sítě v dané oblasti. Jelikož byly pro zjednodušené zpracování diplomové práce poskytnuty pouze sumární zátěže na daném paprsku, tak nelze navrhnout konkrétnější opatření proti výše popsané poruše než posílit v daném úseku vedení, tak aby nebylo při výpadku napáječe VN0001 přetěžováno.

7.8.2 Simulace sítě s výpadkem napáječe VN0002

U druhé simulace výpadku bude simulován výpadek napáječe VN0002. Tento napáječ napájí transformátory T1-1081, T2-1081 a T1-1092, které budou tedy v případě poruchy odstaveny a síť bude napájena pouze transformátory T1-1069, T1-1060 a T1-1103, které budou napájeny napáječem VN0001. Bude provedeno simulování stavu, kdy nastane porucha VN0002 a v rámci normálního provozu mřížové sítě budou sepnuté spínače S38, S12, S33, S34, S19, S18, S41, S27, S32 a S24.

Tabulka 27 – Zatížení transformátorů při výpadku napáječe VN0002

Název prvku	Uzel	I [A]	α [°]	P [kW]	Q [kVAr]	S [kVA]	Zatížení [%]
T1 - 1069	R9574 VN	3,84	-5,73	150,73	13,55	151,33	37,83
T1 - 1060	R9574 VN	6,70	-23,05	244,00	100,87	264,03	66,01
T1 - 1103	R9574 VN	4,05	-10,35	157,16	27,03	159,47	39,87

Tabulka 28 – Zatížení napáječe VN0002 při výpadku napáječe VN0002

Název prvku	Uzel	I [A]	α [°]	P [kW]	Q [kVAr]	S [kVA]
VN0001	R9574 VN	14,451	165,031	-551,888	-141,446	569,726

Tabulka 29 – Kabely s největším úbytkem při výpadku napáječe VN0002

Název prvku	U [kV]	α [°]	dUn [%]
R60	0,39	-2,64	3,02
R61	0,39	-2,63	3,03
R57	0,39	-2,63	3,03
RZ55	0,39	-2,63	3,10
RZ60	0,39	-2,64	3,10
U196	0,39	-2,63	3,03
U197	0,39	-2,63	3,03

Z tabulek výše lze vyčíst, že napáječ VN0001 dodává do městské distribuční sítě NN výkon 570 kVA, což je o 10 kVA méně než u výpadku napáječe VN0002, což je dáno významně kratšími kabelovými trasami. Zatížení transformátorů se pohybuje okolo 48 %, přičemž transformátor T1-1060 je o více než 20% přetížen než transformátory T1 – 1069 a T1 – 1103.

Dále jsou u výpadku napáječe VN0002 menší úbytky napětí, které se pohybují okolo $\pm 3\%$. Nejvíce je při této simulaci zatíženo kabelové vedení s označením 50 a to na 60%, proto je vhodné při výpadku

napáječe VN0002 sepnout spínač S40, který zmenší zatížení kabelu 50 pod 50% zatížení, a tak budou všechny kabely při simulaci zatíženy pod 50.

8. Závěr

Diplomová práce je dělena do dvou částí, kdy se první část zabývá historií, problematikou a topologiemi distribučních sítí, kde je věnováno více prostoru mřížovým sítím, jejich výhodám a nevýhodám a dále simulace sítě s nesplněnými podmínkami pro paralelní provoz.

Druhá část diplomové práce je věnována simulacím reálné sítě, kdy bylo důležité seznámit se se stavem paprskových sítí v blíže nespecifikované části města Klatovy a zhodnotit stávající stav a přechod na síť mřížovou, včetně analýz poruchových stavů s využitím software DNCalc od společnosti EnerGoConsult ČB s.r.o. Nejprve byla modelována síť ve stávajícím stavu v paprskové topologii. Stávající stav, co se týká parametrů sítě, je naprosto v pořádku a funkční, ale bohužel disponuje nevýhodami paprskové sítě jako je nízká garance zásobování elektrickou energií, kdy vzniklá závada v určitém místě paprsku znamená, že zbývající odběry za touto poruchou nebudou už napájeny. Dále bylo také namodelováno, že pokud by došlo k navýšení spotřeby o 100%, tak by transformátory ve stávající paprskové síti nespĺňovaly provozní kritérium mřížové sítě o zatíženosti transformátorů od 25 % až 50 %.

V další části se modeluje přechod na mřížovou síť, kdy jsou jednotlivé paprsky navzájem propojeny v 10 rozváděcích, čímž vznikne tedy nová mřížová síť se dvěma napájecími VN, které napájí celkově 5 distribučních stanic s 6 distribučními transformátory. Simulacemi bylo prokázáno, že paprsková síť je schopná přejít na mřížovou síť, a že je zde výkonová rezerva a nedochází zde tedy k přetěžování transformátorů. Dále i zde bylo také namodelováno, že pokud by došlo k navýšení spotřeby o 100% v mřížové síti, tak by transformátory ve stávající paprskové síti splňovaly provozní kritérium mřížové sítě o zatíženosti transformátorů od 25 % až 50 %.

Během simulování poruchových stavů bylo odhaleno, že kabelové vedení 51_B je zatíženo až na 86% a není zde tedy téměř žádná rezerva pro přenesení vyššího výkonu. Kdyby navíc nastala porucha na spínači S17, tak by bylo následně kabelové vedení 51_B zatíženo na 104 %, čímž by došlo k jeho poškození a následně přetížení dalších kabelů, což by mohlo při špatném nastavení ochran vést až k rozpadu sítě v dané oblasti. Jelikož byly pro zjednodušené zpracování poskytnuty pouze sumární zátěže, tak lze navrhnout pouze posílení vedení v daném úseku. Pokud by tedy v budoucnu došlo k přechodu na mřížovou síť, tak by bylo důležité výpadek napáječe VN0001 detailněji přezkoumat na základě bližších hodnot, kterými disponuje ČEZ distribuce a.s. blíže specifikováno. Mřížová síť je podle simulací vykazuje malé úbytky napětí a malé zatížení transformátorů, což je dáno hlavně tím, že stávající paprsková síť je dostatečně naddimenzovaná.

Seznam použité literatury a informačních zdrojů

- [1] ČERMÁK, CSc., Doc. Ing. Tomáš a Prof. Ing. Svetozar KEPPERT, CSC. *Elektrické stroje: I. Transformátory. II. Ostrava, 1984.*
- [2] Doc. Ing. Petr Toman, Ph.D., Doc. Ing. Jiří Drápela, Ph.D., Doc. Ing. Stanislav Mišák, Ph. D, Doc. Ing. Jaroslava Orságová, Ph. D, Ing. Martin Paar, Ph. D, Ing. David Topolánek a. *Provoz distribučních soustav. Pod Kotlářkou 3, 150 00 Praha 5: EUROPRINT, 2011. ISBN 978-80-01-04935-8.*
- [3] Ing. Dr. Bohumír Pavlovský, DrSc., *Elektrické sítě v městech a sídlištích. Nakladatelství technické literatury: Státní nakladatelství technické literatury, 1975.*
- [4] PORTÁL SVĚT ENERGIE PROVOZUJE SPOLEČNOST ČEZ: TOPOLOGIE DISTRIBUČNÍCH SÍTÍ [online]. [cit. 2022-04-22]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/distribuce-elekriny/distribuce-elektricke-energie-podrobne/topologie-distribucnich-siti/vyklad>
- [5] PORTÁL SVĚT ENERGIE PROVOZUJE SPOLEČNOST ČEZ: DISTRIBUČNÍ SOUSTAVA. ENERGETIKA ZBLÍZKA [online]. [cit. 2022-04-22]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/distribuce-elekriny/distribuce-elektricke-energie-podrobne/distribucni-soustava/vyklad>
- [6] MRAVEC, Ing. Rudolf. *Elektrické stroje a přístroje. Praha: Nakladatelství technické literatur [y, 1979. ISBN 04-506-79.*
- [7] ŠTROBLOVÁ, CSc., Ing. Milada a Ing. Pavla HEJTMÁNKOVÁ. *Elektrické sítě městské a průmyslové. Plzeň: Západočeská univerzita, 1994. ISBN 80-7082-154-X.*
- [8] NOHÁČOVÁ PH.D., Ing. Lucie a Ing. Jiřina MERTLOVÁ CSC. *Electrical substations and lines. Praha: BEN-technická literatura, 2010. ISBN 978-80-7300-265-7.*
- [9] TROJÁNEK CSc., Prof. Ing. Zdeněk. *Řízení elektrizačních soustav. Praha, 1985. Skripta. České vysoké učení technické v Praze.*
- [10] HRADÍLEK DrSC., Prof. Ing. Zdeněk. *Elektroenergetika distribučních a průmyslových sítí. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2008. ISBN 978-80-248-1696-8.*
- [11] Elektrické sítě v městech a sídlištích
- [12] HRADÍLEK DrSC., Prof. Ing. Zdeněk. *Elektroenergetika distribučních a průmyslových zařízení. Ostrava: MONTANEX, 2008. ISBN 978-80-7225-291-6.*
- [13] HODINKA CSC., Prof. Ing. Miroslav. *Elektrické sítě II. Ostrava, 1975. Skripta. Vysoká škola báňská v Ostravě.*
- [14] Na zeleno: Ceny energií stoupají [online]. 28. 8. 2008 [cit. 2022-04-22]. Dostupné z: <https://www.nazeleno.cz/ceny-energiei-stoupaji/>
- [15] SANTARIUS CSC., Doc. Ing Pavel. *Elektrické stanice a vedení. Ostrava: VŠB v Ostravě, 1990. ISBN 80-7078-032-0.*

- [16] Elektronická učebnice: ELUC. Elektronická učebnice: Paralelní chod trojfázových transformátorů [online]. [cit. 2022-04-22]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/762>
- [17] MĚŘIČKA CSC., Doc. Ing. Jiří a Prof. Ing. Zdeněk ZOUBEK CSC. *Elektrické stroje*. Praha, 1971. Skripta. České vysoké učení technické v Praze.
- [18] Circuitglobe.: Parallel Operation of a Transformer [online]. - [cit. 2022-04-22]. Dostupné z: <https://circuitglobe.com/what-is-parallel-operation-of-transformer.html?fbclid=IwAR0jPtt-qDW2b707KmgWRoNsbHOsDfnS7bUrK8c0dHYm736hEyoaj8chKBM>
- [19] Javatpoint.: Parallel operations of transformers [online]. - [cit. 2022-04-22]. Dostupné z: https://www.javatpoint.com/parallel-operations-of-transformers?fbclid=IwAR3batsc0w4Z6dtar4ICWF4IAq6UbbRaZXVnvrtpuVvP_pa5Rvw9QpVtE
- [20] LORINČÍK, Ing. Tomáš. *Elektrické stroje základný kurz*. Bratislava: ALFA – vydavateľstvo technickej a ekonomickej literatúry, 1981. ISBN 63-745-81.
- [21] PRAVIDLA PROVOZOVÁNÍ DISTRIBUČNÍCH SOUSTAV. ČEZ distribuce [online]. Květen 2016 [cit. 2022-04-22]. Dostupné z: https://www.cezdistribuce.cz/webpublic/file/edee/distribuce/ppds/ppds_2016.pdf
- [22] Karel Horák výpočet elektrických sítí
- [23] Elektrické stanice a vedení – Ing. Josef Verner, CSc.
- [24] ČEPS [online]. 31. 12. 2020 [cit. 2022-04-22]. Dostupné z: <https://www.ceps.cz/cs/udaje-o-ps>
- [25] *Energetika v ČR: Spotřeba elektřiny v ČR – dlouhodobý vývoj. Skupina ČEZ [online]. [cit. 2017-03-12]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/promedia/cisla-a-statistiky/energetika-v-cr.html>*
- [26] *DNCalc: Výpočty a simulace distribučních sítí*. EGC – EnerGoConsult ČB s.r.o.
- [27] KATALOG PRODUKTŮ [online]. PRAKAB PRAŽSKÁ KABELOVNA, 2017 [cit. 2022-04-22]. Dostupné z: https://www.prakab.cz/upload/1_AYKY.pdf