

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Distribuční venkovní vedení – konstrukce, způsob
provozu a návrh**

Autor: Jan Täuber

Studijní obor: Elektrotechnika a energetika

Vedoucí práce: Doc. Ing. Lucie Noháčová, Ph.D.

Plzeň 2017

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jan TÄUBER**

Osobní číslo: **E14B0066P**

Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**

Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**

Název tématu: **Distribuční venkovní vedení - konstrukce, způsob provozu a návrh**

Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

Bakalářská práce "Distribuční venkovní vedení - konstrukce, způsob provozu a návrh" bude zaměřena na tyto body:

1. Uveďte základní způsoby provozovaných distribučních venkovních vedení.
2. Charakterizujte stávající způsoby a konstrukční provedení a porovnejte je i s vybranými novodobými zahraničními trendy.
3. Vypracujte návrh venkovního vedení pro konkrétní situaci.
4. Porovnejte varianty z hlediska technického i ekonomického řešení.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Skripta k předmětu "Energetika I" a "Elektrické přístroje".
2. Přednášky a podklady k předmětu "Energetika I" a "Elektrické přístroje".
3. Internetové podklady.
4. Dle uvážení a pokynů udá vedoucí BP.

Vedoucí bakalářské práce:

Doc. Ing. Lucie Noháčová, Ph.D.

Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání bakalářské práce: 14. října 2016

Termín odevzdání bakalářské práce: 8. června 2017

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



Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2016

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá teoretickými znalostmi venkovní distribuční soustavy na území ČR.

Teoretická část se zaměřuje na základní způsoby provozovaných distribučních vedení, konkrétně na topologii sítě a dále vysvětluje jednotlivé provozy uzlu sítě. Následně jsou popsány jednotlivé konstrukční prvky distribučního vedení. V závěru teoretické části jsou uvedeny novodobé zahraniční trendy.

Praktická část je vypracována ve spolupráci se společností ČEZ Distribuce a.s. a obsahuje návrh sítě distribuční soustavy pro posílení dodávky elektrické energie k průmyslovému objektu Nová Hospoda.

Klíčová slova: Distribuční vedení, venkovní vedení, uzel sítě, Petersenova zhášecí tlumivka, stožár, izolátor, lano AlFe, zkrat, výkonový vypínač, odpojovač, odpínač, přepětí, zemnicí lano, bleskojistka, omezovač přepětí

Abstract

This bachelor thesis deals with theoretical knowledge of overhead distribution line in territory of Czech republic.

Theoretical part focuses on basic method of operated distribution lines, specifically configuration of lines and explains the network node operation. Then, they are describes individual components of distribution line. At the end of theoretical part are presented modern international trends.

Practical part is created in cooperation with ČEZ Distribution a.s. and contains suggestion of distribution line to strengthen electricity supply for industrial building Nová Hospoda.

Keywords: Distribution line, overhead line, node network, Petersen choke, tower, insulator, ACSR (aluminium conductor steel reinforced), short circuit, circuit breaker, disconnector, switch disconnector, overvoltage, grounding cable, arrester, surge arresters

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem danou práci vypracoval samostatně a veškeré použité zdroje uvedl v seznamu použité literatury. Nejvíce informací jsem použil z obsahu přednášek absolvovaných v předmětech během studia na Západočeské univerzitě v Plzni.

V Plzni, dne: 2017

.....
Jan Täuber

Poděkování:

Rád bych poděkoval mé vedoucí bakalářské práce, paní Doc. Ing. Lucii Noháčové, Ph.D. nejen za odborné vedení, cenné rady a čas poskytnutý během zpracování práce, ale i za vstřícný a trpělivý přístup. Dále bych rád poděkoval panu Ing. Václavovi Kropáčkovi, Ph.D. za jeho ochotu a čas strávený při konzultacích k praktické části bakalářské práce. V neposlední řadě bych rád poděkoval své rodině za plnou podporu během studia.

Jan Täuber

Obsah

Seznam symbolů a zkratk	9
Úvod	10
1 Základní způsoby provozovaných distribučních venkovních vedení	11
1.1 Venkovní vedení	11
1.2 Způsoby provozu	11
2 Stávající způsoby a konstrukční provedení	14
2.1 Stožáry	14
2.2 Vodiče a kabely	15
2.3 Konzoly	17
2.4 Izolátory	18
2.5 Ochranné prvky na vedení	19
2.6 Spínací přístroje	22
2.7 Novodobé zahraniční trendy	24
3 Návrh venkovního vedení pro konkrétní situaci	26
3.1 Parametry vedení	26
3.1.1 Činný odpor R	27
3.1.2 Indukčnost L	28
3.1.3 Kapacita C	28
3.1.4 Svod G	29
3.2 Proudové a napěťové poměry na vedení	29
3.3 Zkratové poměry na vedení	31
3.4 Varianta I	33
3.4.1 Výpočet parametrů sítě	35
3.4.2 Výpočet úbytku napětí	36
3.4.3 Výpočet zkratových proudů	38
3.5 Varianta II	39
3.5.1 Výpočet parametrů sítě	40
3.5.2 Výpočet úbytku napětí	41
3.5.3 Výpočet zkratových proudů	43
4 Porovnání variant z technického a ekonomického hlediska	45
Závěr	46
Seznam použité literatury	49

Seznam symbolů a zkratk

Veličina	Jednotka	Název
R_{SS}	$(\Omega \cdot \text{km}^{-1})$	Stejnoseměrný odpor
ρ	$(\mu\Omega \cdot \text{m})$	Měrná rezistivita
S	(mm^2)	Průřez vodiče
k_9	(-)	Činitel zvětšení odporu vlivem teploty
k_S	(-)	Činitel zvětšení odporu vlivem skin efektu
α	$(1/\text{K})$	Teplotní součinitel elektrického odporu
β	$(1/\text{K})$	Teplotní součinitel roztažnosti
l	(m)	Délka vodiče
T_0, T_1	$(^\circ\text{C})$	Teplota vedení
R_{AlFe}	$(\Omega \cdot \text{km}^{-1})$	Odpor AlFe lana
L_P	$(\text{mH} \cdot \text{km}^{-1})$	Provozní indukčnost
d_s	(m)	Střední vzdálenost mezi vodiči
d_{12}, d_{13}, d_{23}	(m)	Vzdálenost mezi jednotlivými vodiči
X_P	$(\Omega \cdot \text{km}^{-1})$	Induktivní reaktance
D, D'	(-)	Potenciálové koeficienty
h_s	(m)	Střžení výška vodiče nad zemí
r	(m)	Poloměr vodiče
h_1, h_2, h_3	(m)	Výška jednotlivých vodičů nad zemí
C_0	$(\text{nF} \cdot \text{km}^{-1})$	Kapacita mezi vodičem a zemí
C_P	$(\text{nF} \cdot \text{km}^{-1})$	Provozní kapacita
B_P	$(\text{S} \cdot \text{km}^{-1})$	Kapacitní susceptance
ω	$(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	Úhlová rychlost
U_{1f}, U_{2f}	(V)	Vstupní/výstupní fázové napětí
I_{1f}, I_{2f}	(A)	Vstupní/výstupní fázový proud
\bar{Z}_V	(Ω)	Vlnová impedance
$\bar{\gamma}$	(-)	Činitel šíření
$\bar{A}, \bar{B}, \bar{C}, \bar{D}$	(-)	Blondelovy konstanty
\bar{Z}	(Ω)	Podélná impedance
\bar{Y}	(S)	Příčná admitance
ΔU_f	(V)	Fázový úbytek napětí
$\Delta u\%$	(%)	Procentní úbytek napětí
$\cos\varphi$	(-)	Účinník
I_K	(A)	Rázový zkratový proud
I_{km}	(A)	Nárazový zkratový proud
K	(-)	Součinitel nárazového zkratové proudu
I_{th}	(A)	Ekvivalentní oteplovací proud
k_e	(-)	Koeficient pro ekvivalentní oteplovací proud
c	(-)	Napětový součinitel
X_C	(Ω)	Celková zkratová impedance
S_K	(VA)	Třífázový zkratový výkon v místě připojení
S_T	(VA)	Jmenovitý zdánlivý výkon transformátoru
X_{ES}	(Ω)	Zkratová impedance elektrizační soustavy
X_T	(Ω)	Zkratová impedance transformátoru
X_V	(Ω)	Zkratová impedance vedení

Úvod

Velice důležitou součástí dnešního života je elektrická energie, kterou se zabývá obor elektroenergetika. Tento obor se zaměřuje na výrobu, dopravu a užití elektrické energie. Během těchto procesů dochází k nežádoucím jevům, které je potřeba správným způsobem řešit.

Cílem mé práce je nastínit problematiku provozu distribuční soustavy. Ta se může provozovat venkovním nebo kabelovým vedením. Ve své práci se však budu zabývat pouze venkovním vedením, tak jak bylo zřejmé ze zadání bakalářské práce.

V teoretické části objasním způsoby provozu a konstrukční provedení distribuční soustavy. Dále také nastíním novodobé zahraniční trendy.

Praktická část bude věnována samotnému návrhu venkovního vedení. Následně zjistím optimální návrh vedení pomocí matematických výpočtů a na závěr obě varianty porovnáme z technického a ekonomického hlediska.

1 Základní způsoby provozovaných distribučních venkovních vedení

1.1 Venkovní vedení

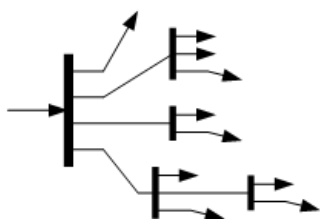
Venkovní vedení distribuční soustavy ČR je provozováno na napětových hladinách od 0,4kV do 110kV. Oproti kabelovému vedení je levnější na výstavbu i následnou údržbu, avšak mezi nevýhody patří větší úbytky na vedení a větší poruchovost. Při návrhu venkovního vedení hledáme kompromis mezi elektrickými a mechanickými vlastnostmi a cenou vedení. Důležitým aspektem při návrhu je výběr správných materiálů a technologií. Mezi mechanické vlastnosti venkovního vedení patří namáhání, které se určuje z důvodu povětrnostních podmínek a námrazku a také průhyb, který je potřeba zjistit kvůli minimální výšce vedení nad zemí, cestami, kolejnicemi nebo jinými vedeními. Mezi hlavní provozovatele distribuční soustavy venkovního vedení patří společnosti ČEZ, E.ON a PRE.

1.2 Způsoby provozu

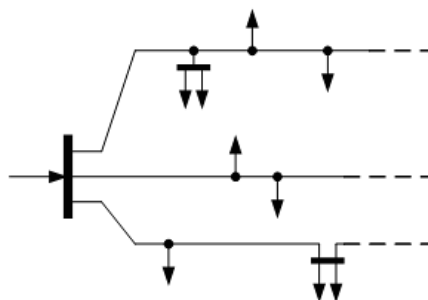
Venkovní vedení se provozuje jako otevřený nebo uzavřený rozvod. Rozlišuje se podle způsobu napájení a rozdělení výkonů.

Otevřený rozvod

Otevřený rozvod je způsob provozu, který přivádí elektrickou energii pomocí jednotlivých cest. Mezi dva typy zapojení patří paprskový a průběžný rozvod. Paprskový rozvod se používá u sítí, kde nemáme vysoké nároky na spolehlivost, neboť jednotlivé odběry jsou napájeny jedním vývodem. To znamená, že při poruše na paprsku dojde k výpadku elektrické energie na všech odběrných místech. Ze všech rozvodů je paprskový nejlevnější na výstavbu. Průběžný rozvod přechází z dlouhých vedení s odbočkami na paprskový rozvod. Spolehlivost tohoto rozvodu je opět velmi nízká. Z důvodu dlouhých průběžných vedení je třeba kontrolovat hodnotu úbytku na napětí na vedení. Používá se například jako veřejné osvětlení.



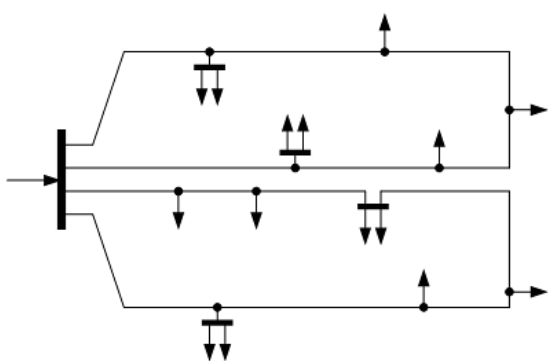
Obrázek 1.1 Paprskový rozvod [15]



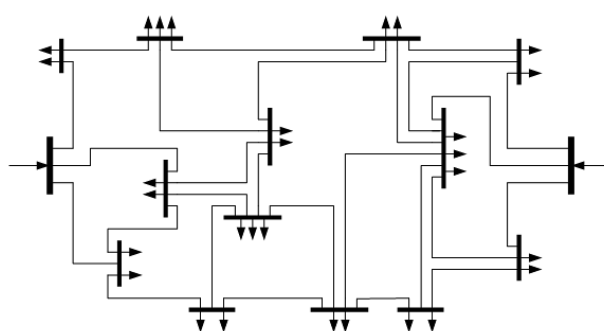
Obrázek 1.2 Průběžný rozvod [15]

Uzavřený rozvod

V uzavřeném rozvodu lze odběr napájet ze dvou a více stran. Nejčastěji ho rozdělujeme na rozvod okružní a mřížový. Okružní rozvod umožňuje napájení jednoho odběru ze dvou míst, což má za následek zvýšení spolehlivosti dodávky elektrické energie. V případě poruchy se poškozená část odpojí a vedení se provozuje jako dva paprskové rozvody. Mřížový rozvod je napájen alespoň ze dvou míst s hlavními rozvaděči, které napájejí hustou síť podružných rozvaděčů alespoň minimálně ze dvou směrů. Tento rozvod nám umožňuje nejspolehlivější dodávku elektrické energie, avšak za cenu velkých nákladů. Tento druh rozvodu je schopný pokrývat velké plochy s mnoha odběry.



Obrázek 1.3 Okružní rozvod [15]

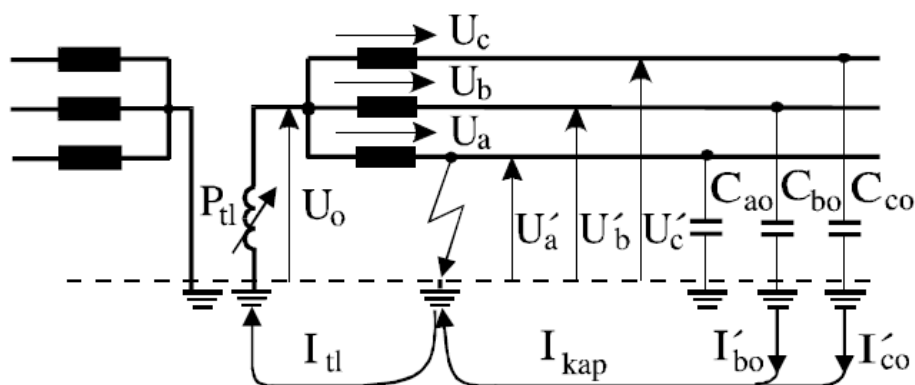


Obrázek 1.4 Mřížový rozvod [15]

Sítě venkovních vedení distribuční soustavy, kterými se ve své práci zabývám, se provozují jako sítě s neúčinně uzemněným nebo izolovaným uzlem.

Neúčinně uzemněná soustava

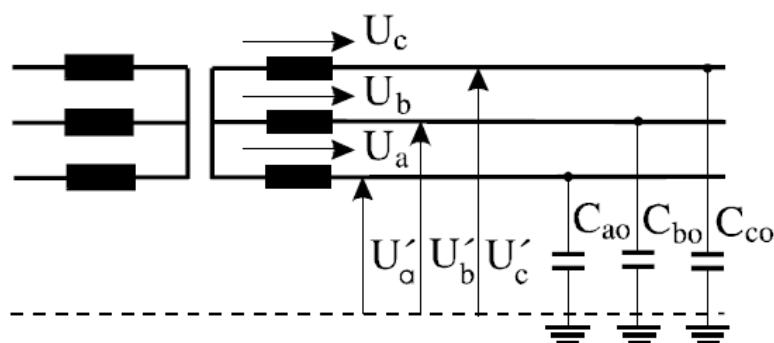
Neúčinně uzemněné sítě jsou sítě, jejichž uzel je spojený se zemí přes velkou impedanci. U venkovních vedení se nejčastěji používá zhášecí Petersenova tlumivka, která v případě nesymetrie fázových napětí proti zemi kompenzuje kapacitní zemní proud, proudem induktivního charakteru. Výsledný poruchový proud je výsledkem činnosti připojení tlumivky, která omezí velikost kapacitního poruchového proudu. Požadavkem je, aby zhášecí tlumivka byla regulovatelná, tedy její proud se mohl měnit podle zemního proudu. V případě správně naladěné tlumivky teče místem zemního spojení poruchový proud nejmenší velikosti, který je daný ztrátami ve zhášecí tlumivce a svodovými odpory sítě, má činný charakter. Výhodou této sítě je možnost provozu při zemním spojení, tato porucha se pouze signalizuje a není třeba vedení odpojovat.



Obrázek 1.5 Neúčinně uzemněná soustava [studijní materiály FEL ZČU]

Izolovaná soustava

Izolovaná síť se nachází v České republice na napětových hladinách od 6 do 35kV, výjimečně i 0,4kV. Uzly vinutí transformátoru nejsou spojeny se zemí, z toho vyplývá, že při spojení jedné fáze se zemí se objeví fázové napětí na uzlu vinutí transformátoru a napětí zdravých fází vzroste vůči zemi na napětí sdružené. Místem poruchy protéká kapacitní proud, který je dán fázorovým součtem kapacitních proudů zdravých fází. Velikost zemního proudu je dána hustotou sítě a od hodnoty 20 A je třeba ho kompenzovat. Velkou výhodou je, že při poruchovém stavu lze síť dále provozovat, avšak vedení musí být dimenzováno na sdružené napětí.



Obrázek 1.6 Izolovaná soustava [studijní materiály FEL ZČU]

2 Stávající způsoby a konstrukční provedení

V této kapitole se budu zabývat stávajícími způsoby a konstrukčním provedením distribuční soustavy.

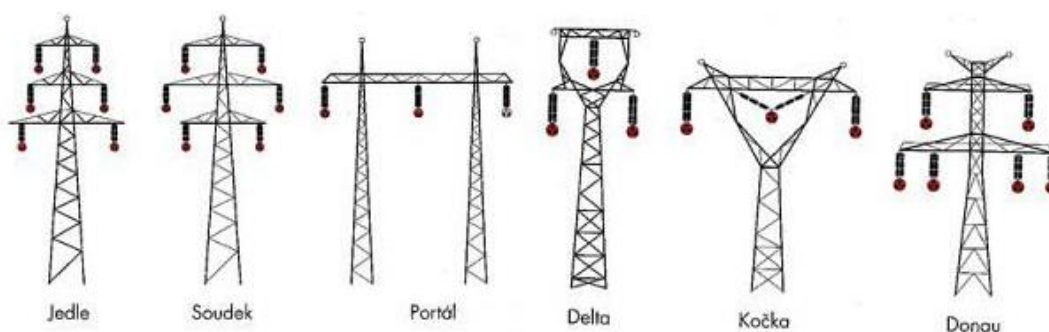
Hlavními konstrukčními komponentami distribuční soustavy jsou vodiče, ty jsou přes izolátory upevněny na konzole stožárů a kabely, které jsou uloženy v zemi. Důležitými prvky na vedení jsou ochrany proti přepětí a také spínací přístroje.

2.1 Stožáry

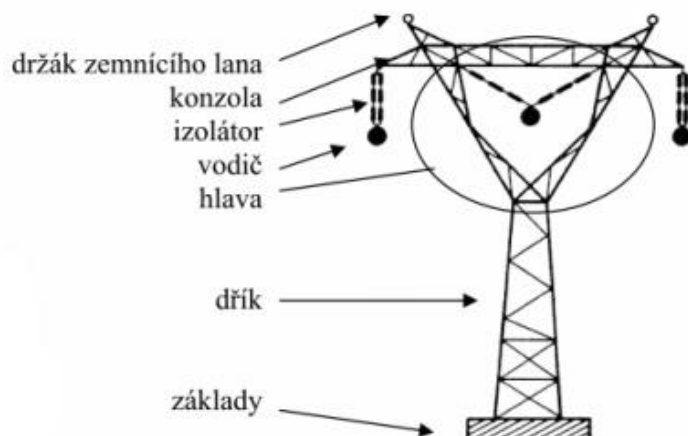
Volba stožáru pro venkovní vedení je velice důležitá pro provoz a bezpečnost celé soustavy. Je potřeba zvolit správný materiál a typ konstrukce pro dlouhodobý a spolehlivý provoz soustavy. Stožáry, jako podpěrné body soustavy, musí být dimenzovány na všechny působící síly, které se vyskytují na vedení, jsou to síly ve svislém (vítr) a vodorovném (tíha) směru. Stožáry lze dělit podle materiálu na: betonové, ocelové, železobetonové a dřevěné.

Ocelové stožáry

Ocelové stožáry se konstruují jako příhradové, trubkové a hraněné. Nejčastěji se však setkáme s příhradovým stožárem, který díky své konstrukci umožňuje vést vícenásobná vedení z holých i jednoduchých izolovaných vodičů. Základní konstrukční částí příhradového stožáru je dřík, který je zasazený do betonového základu. Na dříku je hlava stožáru s konzolou, na které jsou připevněny izolátory. Na stožár je také možné namontovat držáky pro zemnicí lana. Základními údaji pro výběr vhodného stožáru jsou výška stožáru, jejíž hodnota se pohybuje mezi 12-28 metry a vrcholový tah mezi 20-100 kN. Celou ocelovou konstrukci je třeba chránit před korozi, např. žárovým pozinkováním.



Obrázek 2.1 Typy stožárů [23]



Obrázek 2.2 Popis částí stožáru typu kočka [studijní materiály FEL ZČU]

Betonové stožáry

Betonové stožáry se vyrábějí ve tvaru komolého kužele z prefabrikovaného předpjatého odstředěného betonu v délce 9 až 13,5 m a dosahují dovolené vrcholové síly 3 až 20 kN. Tyto sloupy se používají jako nosné, rohové, odbočné i koncové pro jednoduchá a vícenásobná vedení. Každý sloup je opatřen jedním otvorem pro možnost vyvedení svodu uzemnění z vnitřku sloupu a nad ním se nachází štítek z trvanlivého nekorodujícího materiálu. Na štítku jsou vyznačeny značka výrobce, datum výroby a typ sloupu udávající jeho délku a jmenovitou vrcholovou sílu. Na vrcholu sloupu, o průměru nejčastěji 222 mm, je usazena krycí hlavice zabraňující pronikání vlhkosti do stěn sloupu vrcholem. Životnost těchto sloupů je v současnosti nastavena na 30 let.

Dřevěné stožáry

Dřevěné sloupy se používají ve špatně dostupných místech, kde je komplikovaná instalace betonových stožárů. Jsou využívány v chráněných krajinných oblastech, národních parcích, obcích, atd. Sloupy se upevňují na železobetonovou patku, která je vetknuta do země. Je možné zapustit sloup přímo do země (1/5 délky), a však je nutné dřevo chránit proti hnilobě hloubkovou impregnací. Pro VN se tyto sloupy zhotovují v délce 7 až 14 metrů.

2.2 Vodiče a kabely

Zřejmě nejdůležitějším parametrem při navrhování venkovního vedení je typ vodiče a jeho průřez. Od tohoto se následně odvíjí cena vedení, typ stožáru, montáž vedení a celková

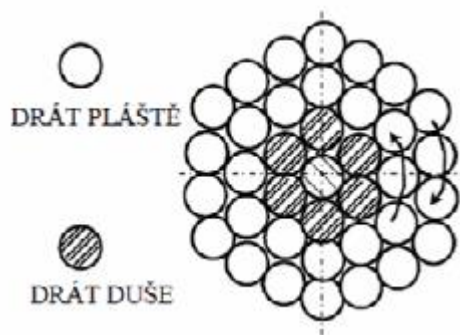
bezpečnost. Požadavky na vodiče jsou velice protichůdné, neboť požadujeme malou měrnou hmotnost kvůli dopravě a montáži, ale na druhou stranu velkou, aby vodiče nebyly vychylovány větrem. Dále také požadujeme co nejmenší průměr kvůli účinkům větru, ale také je potřeba snížení ztrát korónou, čehož docílíme zvětšením průměru. Dalšími požadavky jsou například velká mechanická pevnost, odolnost proti chemickým vlivům a změnám teploty a také cena.

Holé vodiče se nejčastěji vyrábějí z materiálů měď, hliník a ocel. Zhotovují se ve tvarech kulatých drátů nebo jako AlFe lana. Dnes se dráty používají jen do napětí 1kV. Nejpoužívanějšími holými vodiči jsou kombinovaná AlFe lana. Ta se skládají z ocelového pozinkovaného nosného drátu (duše) a z hliníkových drátů slaněných okolo s čistotou 99,7%. Tato lana se vyznačují vysokou pevností v tahu a je vhodné je instalovat do míst, kde se vyskytuje velká námraza.

Označení lana AlFe 6 240 znamená: 240 ... jmenovitý průřez hliníkové části (mm^2)

6 ... poměr hliníkové a ocelové části

40 mm^2 ... průřez ocelové nosné části



Obrázek 2.3 AlFe lano [studijní materiály FEL ZČU]

V místech, kde je potřeba zúžit ochranné pásmo nebo je zvýšené nebezpečí pádu stromu do vedení, se používají vedení s jednoduchými izolovanými vodiči. Tyto vodiče jsou buď prostá slaněná lana z hliníku nebo kombinovaná AlFe lana. Jako izolace se používá slabá vrstva PVC, z tohoto důvodu jsou tato vedení považována z hlediska ochrany před nebezpečným dotykem živých částí za vedení bez ochrany.

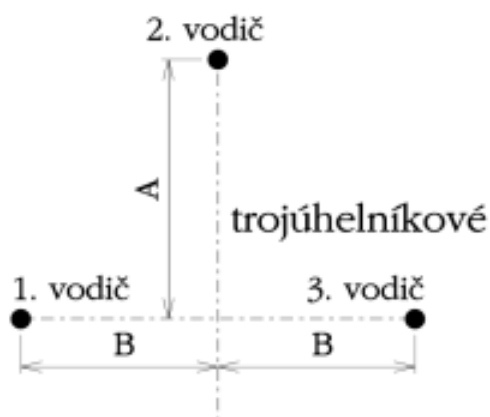
V hustě zastavěných lokalitách, kde není vhodné použít zemní kabel, se používají zpravidla slané závěsné kabely AXEKVCEz. Jsou to svazkované třížilové kabely s izolací a stíněním, zavěšené pomocí nosného ocelového lana o průřezu 50mm^2 , které je žárově nebo galvanicky pozinkované. Používají se pro venkovní kabelová vedení o napětí 22 a 35kV. Jejich výhodou je malá poruchovost a bezpečnost provozu, avšak za cenu velké pořizovací ceny.



Obrázek 2.4 Slané závěsné lano [podklady poskytnuté konzultantem]

2.3 Konzoly

Konzola slouží pro upevnění vedení přes izolátory na podpěrný bod. Rozlišují se dle druhu, typu a účelu stožáru a také podle fázové rozteče a vrcholové síly. Běžně používaným uspořádáním vodičů je jednoduché vedení do tvaru trojúhelníka, toho je docíleno konzolemi Delta nebo Pařát. Výhodou je, že svým tvarem zajišťují ochranu proti dohledu ptactva. Pro jednoduchá vedení se používá i uspořádání jednostranný soudek.

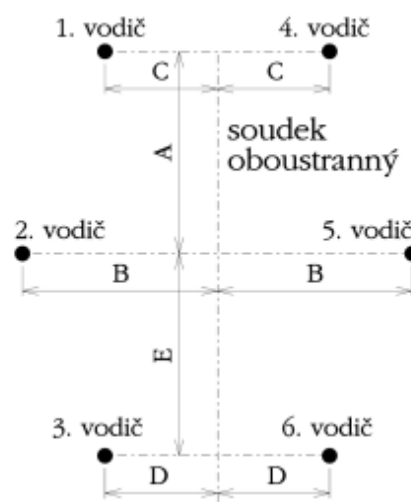


Obrázek 2.5 Trojúhelníkové uspořádání [25]



Obrázek 2.6 Konzole Pařát [24]

V ojedinělých případech je možno použít i rovinné uspořádání. Dvojitá vedení se vyskytují pouze na betonových nebo příhradových podpěrných bodech. Nejčastěji v uspořádání oboustranný soudek. Vodiče jsou umístěny ve třech výškách umístěny na jednotlivých konzolách.



Obrázek 2.7 Oboustranný soudek [25]

2.4 Izolátory

Izolátory slouží pro mechanické upevnění a současně izolační oddělení vodičů od stožáru. Zásadním požadavkem na izolátory je, že musí být neprůrazné. Musí odolávat velkému mechanickému zatížení, způsobenému tíhou vodičů nebo v zimě námrazou. Důležitá je i odolnost vůči chemickým vlivům a změnám teploty. Nejčastěji se izolátory vyrábějí z materiálů porcelán, sklo nebo kompozitní materiály, které se vyznačují dlouhou životností, nízkými nároky na údržbu a malou hmotností. Izolátory mohou být buď závěsné, nebo podpěrné.

Podpěrné izolátory

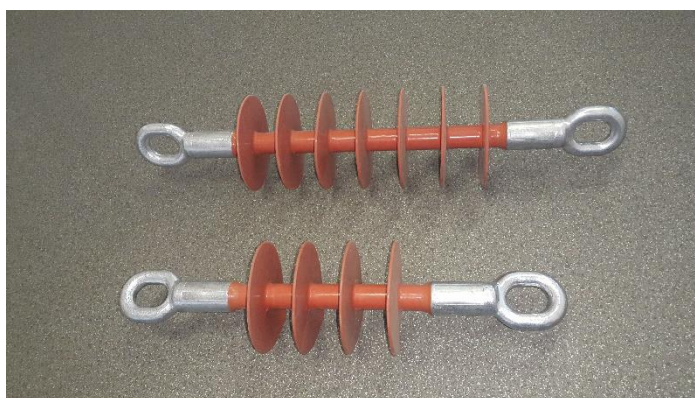
Podpěrné izolátory se vyskytují se na nosných a rohových podpěrných bodech s holými nebo jednoduchými izolovanými vodiči všech povolených průřezů, a to do maximální dovolené pevnosti izolátorů. Požívají se také pro vytvoření bezpečnostního závěsu holých vodičů, nebo jako propojení vodičů na stožárech. Podpěrné izolátory musí snést 2,5násobek síly vytvářené vodičem při různých provozních a klimatických podmínkách.



Obrázek 2.8 Podpěrný izolátor VN z kompozitního materiálu [22]

Závěsné izolátory

Závěsné izolátory se používají pro napětí od 22kV pro upevnění holých a jednoduchých izolovaných vodičů a jsou určeny pro nosné a kotevní řetězce, které mohou být jednoduché, dvojité nebo vícenásobné. Izolátorové řetězce a závěsy se zhotovují z tyčových, dřívkových nebo talířových izolátorů. Krátkodobě musí vydržet trojnásobek síly vyvolané vodičem. Pro zvýšení elektrické pevnosti se zvětší počet talířů nebo dřívků.



Obrázek 2.9 Závěsný izolátor z kompozitního materiálu [22]

2.5 Ochranné prvky na vedení

Při provozu se mohou na vedení vyskytovat přepětí, jsou to napětí větší, než nejvyšší dovolená provozní napětí, tedy nežádoucí jev. V takových případech je potřeba ochranných prvků na vedení. Rozlišujeme dva druhy přepětí, atmosférická a provozní.

Atmosférické přepětí je nejnebezpečnější a vzniká s výboji blesků. Přepětí vznikne buď naindukováním proudu od blesku do vedení, nebo přímým úderem blesku do fázového vodiče, zemnicího lana nebo stožáru. Tato přepětí se omezují zemnicími lany, bleskojistkami nebo omezovači přepětí.

Provozní přepětí vznikají vlivem jevů v soustavě, jsou to například dlouho trávající přepětí při Ferrantiho jevu nebo trvalém zemním spojení. Krátkodobá přepětí vznikají při spínacích pochodech, jako například vypínání zkratového proudu. Provozní přepětí se omezují pomocí jiskřišť a zařízeními pro opětovné zapnutí.

Zemnicí lana

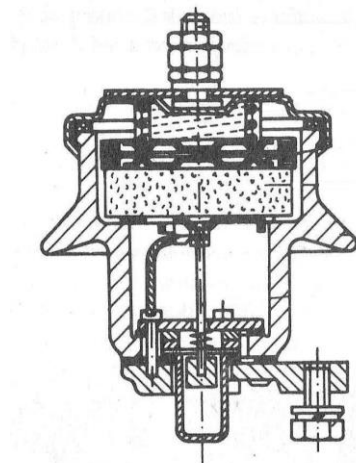
Zemnicí lana slouží k ochraně proti přímému úderu blesku do vedení, jsou pevně upevněna na vrcholech stožárů, které jsou uzemněny. Zhotovují se jako ocelová nebo AlFe lana. Můžeme se také setkat s kombinovanými KZL lany, která slouží také k přenosu informací pomocí skleněného vlákna. Zemnicí lana se používají převážně na vedení VVN,

nebo jako výběhová lana z rozvodny u VN.

Ventilové bleskojistky

Ventilové bleskojistky jsou tvořené sériově řazenými jiskřišti a napěťově závislými odpory SiC, hermeticky uzavřenými v porcelánové komoře, která je naplněna tzv. suchým vzduchem. Díky sériovému řazení jiskřišť dochází k rychlému chlazení a deionizaci oblouku, což vede k dobrým zhášecím schopnostem.

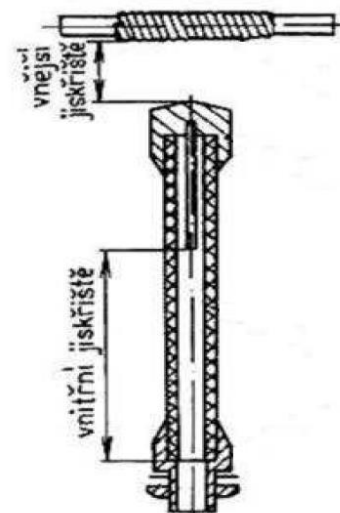
Pokud se na kontakty bleskojistky dostane napětí vyšší než zápalné, vznikne oblouk mezi jiskřišti a přes odpory s malou impedancí vede proud do země. Po odeznění přepětí musí odpor narůst, aby se zmenšil proud, který po dalším průchodu harmonické funkce nulou zaniká.



Obrázek 2.10 Řez ventilovou bleskojistkou [21]

Vyfukovací bleskojistky

Vyfukovací bleskojistky (Torokovy trubice), obsahují dvě jiskřiště zapojená do série. Vnější jiskřiště je umístěné ve vzduchu a zastává funkce odpojovače. Vnitřní je umístěno v trubce z plynotvorného materiálu, ve kterém dojde k uhašení oblouku. Při vzniku přepětí se zapálí oblouk mezi oběma jiskřišti. Díky hoření oblouku se ve vnitřním jiskřišti odpařuje plyn z materiálu trubky, který oblouk ochlazuje a deionizuje okolí. Oblouk ztrácí energii a při průchodu harmonického průběhu nulou zhasíná. Nevýhodou je krátká životnost z důvodu degradace zplyňující látky.



Obrázek 2.11 Řez vyfukovací bleskojistkou [21]

Bleskojistky jsou již dnes zastaralým typem svodičů, které byly vytlačeny omezovači přepětí ZnO.

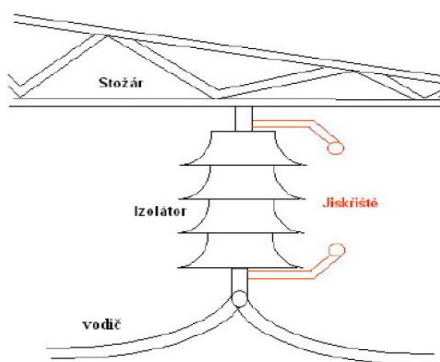
Omezovače ZnO

Omezovače ZnO se dnes považují za nejspolehlivější a nejrozšířenější svodiče přepětí. Zhotovují se jako sloupec varistorů v pouzdře naplněném plynem. Jejich velkou výhodou je vysoká nelinearita, které se docílí spékáním granulemi oxidu zinečnatého. Díky těmto napětově závislým odporům, má omezovač schopnost omezit následný proud po odeznění přepětí, jedná se tedy o omezovač bez jiskřiště.

Při provozním napětí je omezovač uzavřen a protéká jím zanedbatelný proud s kapacitní a činnou složkou. Při přepětí omezovač začne propouštět velký proud do země, který narůstá mnohem rychleji než napětí. Po odeznění přepětí se obnoví vysoká rezistivita a omezovač začne propouštět opět zanedbatelný proud.

Ochranné jiskřiště

Ochranná jiskřiště, konstrukčně nejjednodušší omezovače přepětí, slouží jako ochrana méně důležitých zařízení. Používají se jako doplňková ochrana nebo v kombinaci se svodiči přepětí. Jedná se o dvě kovové elektrody umístěné například na izolátorech, vzdálené o tzv. doskok. Přeskokové napětí mezi dvěma elektrodami je tím vyšší, čím strmější je nárůst přepětí. Omezuje přepětí za cenu zkratu. Oblouk mezi elektrodami je udržován i po odeznění přepětí, protože je udržován jmenovitým napětím soustavy. Pro uhašení oblouku je nutné vypnout postiženou část sítě.



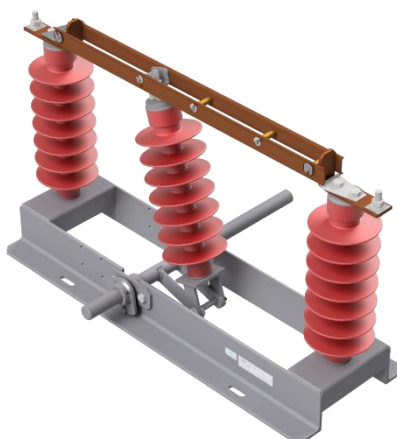
Obrázek 2.12 Ochranné jiskřiště na závěsném izolátoru [20]

2.6 Spínací přístroje

Na distribučních vedení se také nacházejí spínací přístroje, konkrétně na každé odbočce. Jejich úkolem je spínání obvodů při různých provozních situacích. Spínací přístroje rozdělujeme na odpojovače, odpínače, výkonové vypínače a úsečníky.

Odpojovače

Odpojovače jsou elektrické přístroje, které slouží k viditelnému a bezpečnému odpojení vedení. Používají se v rozvodnách a transformovnách vvn a vn. Nemají zhášecí systém, to znamená, že vypínají elektrický obvod bez zatížení, popřípadě zatížený proudem podstatně menším než jmenovitým. V sepnutém stavu musí snést zkratové proudy a v rozepnutém nesmí dojít k přeskokům mezi kontakty. Ty se zhotovují jako nožové, lamelové, nebo například jako pantograf. Pohon i odpojovačů může být motorový, zastaralý tlakovzdušný, nebo i v nouzovém režimu ruční.



Obrázek 2.13 Venkovní odpojovač [18]

Odpínače

Odpínače, jsou spínací přístroje vn, které dokáží spínat vedení pod zatížením až do své vypínací schopnosti. Nedokáží však spínat zkraty. V zapnutém stavu musí snést zkratový proud a v rozepnutém musí splňovat bezpečnou vzdálenost mezi kontakty. Podle zhášecího systému se rozdělují na vzduchové, vakuové, máloolejové nebo s plynem SF₆. V kombinaci s výkonovou pojistkou vn může vypínat i zkraty.



Obrázek 2.14 Odpínač s máloolejovou zhášecí komorou [20]

Výkonové vypínače

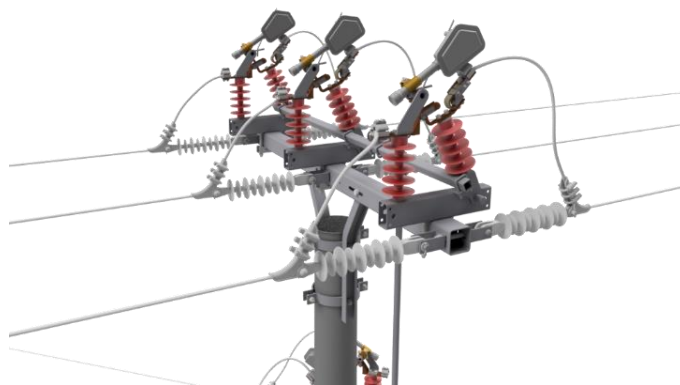
Výkonové vypínače, jsou spínací přístroje vn a vvn, které dokáží spínat vedení při zatížení i nadproudech. Při rozpojení není zajištěna viditelná a bezpečná vzdálenost mezi kontakty. Vypínače musí při spínání odolávat elektrickým, mechanickým a tepelným vlivům proudu. Rozdělují se podle zhášecího systému na tlakovzdušné, máloolejové, vakuové a s nevodivým plynem SF₆.



Obrázek 2.15 Máloolejový vypínač [20]

Úsečníky

Úsekové odpínače, jsou spínací přístroje sloužící k odpojení úseku vedení vn. Vypínají proudy menší než jmenovité. Umísťují se na vrcholy stožárů a jsou vybaveny opalovacími kontakty, díky kterým zhasíná oblouk volně ve vzduchu.



Obrázek 2.16 Úsečník na hlavě stožáru [18]

2.7 Novodobé zahraniční trendy

Rozšiřující se aglomerace a průmysl vyvíjejí neustále tlak na přenosovou a distribuční soustavu. Je třeba se zabývat přetížitelností sítě a celkovým zlepšením elektrických a mechanických vlastností vedení. Řešení přichází s lany ACCR (Aluminium Conductor Composite Reinforced), jež mají až 2x větší přenosovou kapacitu než klasická AlFe lana. Jádrem lana je pramen mikrovláken, které jsou vyrobeny z oxidu hliníku, tím je docílena stejná mechanická pevnost jako ocel, a také vysoká vodivost a nízká cena. Plášť lana je tvořen drátkou ze slitiny hliníku a zirkonu, jež se vodivostí blíží hliníku, jsou však mnohem stabilnější při vyšších provozních teplotách. Aplikace těchto lan do současného vedení je velmi jednoduchá, neboť není potřeba zvláštních stožárů ani izolátorů. Nízká hmotnost lana umožňuje větší rozpětí mezi stožáry, což je výhodné u vedení přes vodní plochy a v zalidněných oblastech.



Obrázek 2.17 Řez lanem ACCR [19]

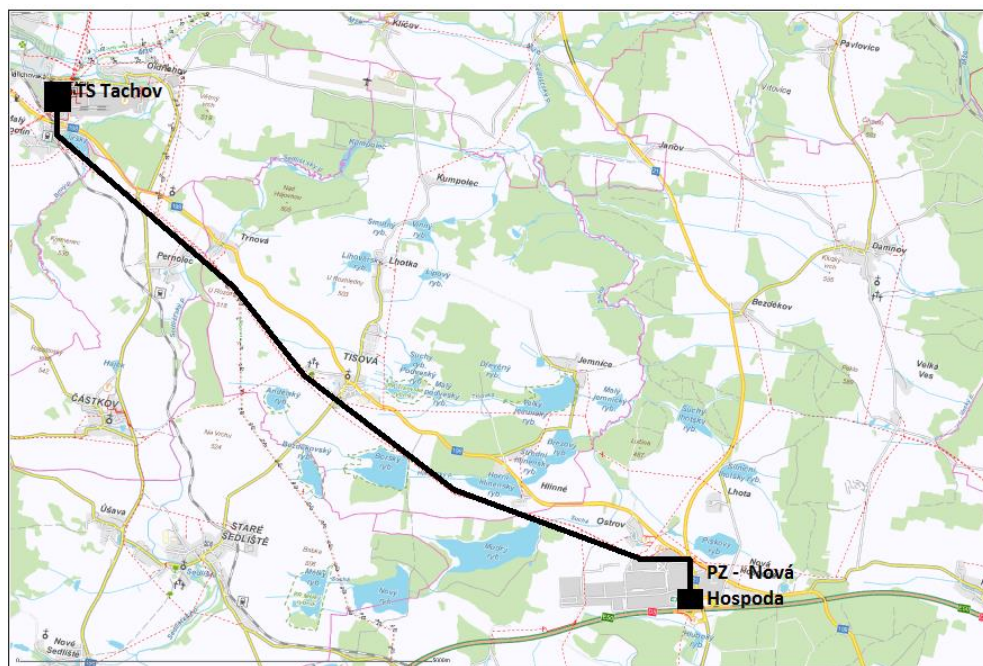
Dalším novodobým trendem v oblasti distribuce elektrické energie je nasazování inteligentních sítí, tzv. Smart Grids. Jedná se o sítě, které jsou schopny efektivně, automaticky a spolehlivě regulovat výrobu a spotřebu elektrické energie v reálném čase.

Princip Smart Grid spočívá ve vzájemné obousměrné komunikaci mezi zdrojem a spotřebičem elektrické energie. Jednou ze základních funkcí je adaptace na různé způsoby výroby elektrické energie pomocí obnovitelných zdrojů, čímž je umožněno zákazníkovi, který vyrábí energii z vlastních zdrojů, prodávat přebytečnou energii zpět do sítě. Velkou výhodou chytrých sítí je díky efektivnější výrobě úspora emisí CO₂, a také úspora zdrojů (uhlí, ropa, plyn).

Důležitým účelem inteligentních sítí je samotné skladování elektrické energie, z důvodu nasazování obnovitelných zdrojů. To nám poté umožňuje vyrovnávání špiček v denním diagramu zatížení. Nejznámějším způsobem akumulace energie jsou přečerpávací vodní elektrárny, které v době minimální spotřeby pracují v motorickém režimu, kdy čerpají vodu z dolní do horní nádrže. V momentu, kdy je potřeba dorovnat výkonovou špičku se přečerpávací elektrárna přepne do generátorického režimu, tedy přetok vody z horní do dolní nádrže. Dalšími prvky pro možné využití akumulace energie jsou elektrochemické akumulátory, superkondenzátory a mechanické setrvačníky.

3 Návrh venkovního vedení pro konkrétní situaci

V praktické části se budu zabývat samotným návrhem úseku vedení v rámci distribuční soustavy. Po domluvě s konzultantem budu řešit napájení průmyslové zóny Nová Hospoda. Tento objekt o příkonu 6 MW je od roku 2012 napájen z trafostanice Tachov 110/22 kV. Vedení k průmyslové zóně je taženo vodičem AlFe 3x110/22 mm² o délce 10 km.



Obrázek 3.1 Zjednodušený náhled sítě [mapa vygenerovaná v systému GIS]

Následující návrh bude obsahovat řešení sítě pro zálohu objektu a posílení výkonu o 1MW z nedaleké rozvodny Bělá 110/22 kV. První návrh bude obsahovat vybudování zcela nového vedení z TS Bělá k PZ Nová Hospoda. V druhém případě zjistím možnost rekonstrukce již existujícího vedení z TS Bělá směřujícího k areálu Nová Hospoda a vyvedení výkonu z něj k objektu PZ.

Pro oba případy zjistím optimální typ vodiče, úbytky napětí a mimo jiné i zkratové poměry. Na závěr oba návrhy porovnám z technického a ekonomického hlediska.

V následující kapitole charakterizují jednotlivé parametry na vedení, definují napěťové a proudové poměry na vedení a uvedu výpočty pro účinky zkratových proudů.

3.1 Parametry vedení

Každé venkovní vedení se dá představit jako dvojbran složený z elektrických pasivních

parametrů. Tyto primární parametry jsou činný odpor R (Ω/km), indukčnost L (H/km), kapacita C (F/km) a svod G (S/km). Sekundárními parametry vedení jsou induktivní reaktance X (Ω/km), kapacitní vodivost (susceptance) B (S/km), podélná impedance Z (Ω/km) a příčná admitance Y (S/km). Všechny tyto parametry jsou přepočítané na jednotku délky.

3.1.1 Činný odpor R

Měrný odpor symetrického venkovního vedení lze vyjádřit ze vztahu:

$$R_{ss} = \frac{\rho}{S} \cdot l \quad (\Omega \cdot \text{km}^{-1}) \quad (3.1)$$

- ρ – měrný odpor vodiče, udávaný při teplotě 20°C , dle tabulky č. 1

V případě, kdy potřebuji pro následující výpočty přesnou hodnotu rezistence, je potřeba uvažovat i další vlivy na vedení, které vyjadřujeme koeficienty. Výsledný vztah pro měrnou rezistenci vedení je:

$$R = R_{dc} \cdot k_{\theta} \cdot k_s \quad (\Omega \cdot \text{km}^{-1}) \quad (3.2)$$

- k_{θ} - činitel zvětšení odporu vlivem teploty, vypočteme ze vztahu (3.3)
- k_s - činitel zvětšení odporu vlivem povrchového jevu, respektuje skinefekt
- pro jeho velikost můžeme zanedbat, největší vliv na hodnotu odporu má vliv teploty

$$k_{\theta} = 1 + \alpha(T_1 - T_0) + \beta(T_1 - T_0)^2 \quad (3.3)$$

- α - teplotní součinitel elektrického odporu
- β – teplotní součinitel roztažnosti [7]

Tabulka 1 Měrná rezistivita a teplotní součinitele pro nejpoužívanější materiály

Materiál	ρ ($\mu\Omega \cdot \text{m}$)	α (1/K)	β (1/K)
Hliník	0,0282	0,004	$1,1 \cdot 10^{-6}$
Měď	0,0178	0,00393	$0,45 \cdot 10^{-6}$
Železo	0,13	0,0045	$9 \cdot 10^{-6}$

Při uvažování měrného odporu AlFe lana je potřeba si uvědomit, že se lano skládá z ocelové a hliníkové části, kdy každá má jiný měrný elektrický odpor a teplotní součinitele. Výsledný vztah pro měrný elektrický odpor AlFe lana je:

$$R_{AlFe} = \left(\frac{1}{R_{Al}} + \frac{1}{R_{Fe}} \right)^{-1} \quad (\Omega \cdot km^{-1}) \quad (3.4)$$

3.1.2 Indukčnost L

Následně je potřeba určit provozní indukčnost (3.5) a z ní vycházejí vztah pro induktivní reaktanci (3.6). Velikost provozní indukčnosti je závislá na rozteči mezi lany, tedy typu konzole, a také na tloušťce lana. V případě rovnoměrného zatížení, je možno uvažovat stejnou indukčnost ve všech fázích, tedy výsledná provozní indukčnost vychází z průměru indukčností jednotlivých fází.

$$L_p = 0,46 \cdot \log \frac{d_s}{r} \quad (mH \cdot km^{-1}) \quad (3.5)$$

- d_s - střední vzdálenost mezi vodiči

$$d_s = \sqrt[3]{d_{12} \cdot d_{13} \cdot d_{23}} \quad (m) \quad (3.6)$$

Při následujících výpočtech budeme používat hodnotu induktivní reaktance, kterou vypočteme ze vztahu:

$$X_p = \omega L_p \quad (\Omega/km) \quad (3.7)$$

3.1.3 Kapacita C

Pro zjištění provozní kapacity, budeme uvažovat stejně jako u provozní indukčnosti souměrně zatížené symetrické vedení. V první řadě je potřeba stanovit hodnoty potenciálových koeficientů D a D' , jenž jsou dány průměrem potenciálových koeficientů jednotlivých fází.

$$D = 41,3 \cdot 10^6 \cdot \log \frac{2h_s}{r} \quad (-) \quad (3.8)$$

$$D' = 41,3 \cdot 10^6 \cdot \log \frac{\sqrt{4h_s^2 + d_s^2}}{d_s} \quad (-) \quad (3.9)$$

- h_s - střední výška vodiče nad zemí

$$h_s = \sqrt[3]{h_1 \cdot h_2 \cdot h_3} \quad (m) \quad (3.10)$$

Kapacita mezi vodičem a zemí je poté dána vztahem:

$$C_0 = \frac{1}{D + 2D'} \quad (nF \cdot km^{-1}) \quad (3.11)$$

Provozní kapacita je dána vztahem (3.12) a z ní vycházející kapacitní susceptance dle (3.13).

$$C_p = \frac{1}{D - D'} \quad (nF \cdot km^{-1}) \quad (3.12)$$

$$B_p = \omega C_p \quad (S/km) \quad (3.13)$$

3.1.4 Svod G

Svod vzniká z důvodu nedokonalé izolace, která je ovlivněná například tvarem a materiálem izolátoru, vlhkostí vzduchu a vzdáleností vodičů. Dále vzniká kvůli koruně, jež má nepříznivý vliv na vedení, neboť způsobuje činné ztráty a produkuje vyšší harmonické. Vzhledem k tomu, že řeším distribuční síť vn o napětí 22 kV, mohu vliv svodu zanedbat.

3.2 Proudové a napět'ové poměry na vedení

Při určování proudových a napět'ových parametrů třífázového vedení jsem vycházel z předem určených parametrů vedení (R, X, B a G) a také z předpokladů, že vedení je po celé délce symetrické, pasivní prvky jsou konstantní a napětí a proud mají sinusový průběh. Tyto poměry pak lze popsat tzv. vlnovými rovnicemi, jejichž tvar je:

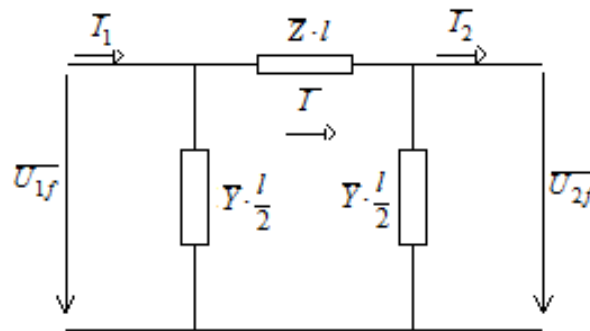
$$\bar{U}_{f1} = \bar{U}_{f2} \cdot \cosh(\bar{\gamma}l) + \bar{Z}_v \cdot \bar{I}_2 \cdot \sinh(\bar{\gamma}l) \quad (3.14)$$

$$\bar{I}_1 = \frac{\bar{U}_{f2}}{\bar{Z}_v} \cdot \sinh(\bar{\gamma}l) + \bar{I}_2 \cdot \cosh(\bar{\gamma}l) \quad (3.15)$$

- \bar{U}_{f1}, \bar{I}_1 - fázory napětí a proudu na začátku vedení
- \bar{U}_{f2}, \bar{I}_2 - fázory napětí a proudu na konci vedení

- \bar{Z}_v - vlnová impedance
- $\bar{\gamma}$ - činitel šíření

Při zanedbání některých parametrů lze tyto rovnice řešit zjednodušeně pomocí dvojbranů. Konkrétně pomocí dvojbranů typu T, II, Γ a Steinmetzův článek. Pro následující výpočet jsem zvolil článek II.



Obrázek 3.2 Náhradní schéma II článku [studijní podklady FEL ZČU]

U takového dvojbranu platí maticová rovnice, ve které zavádíme tzv. Blondelovy konstanty \bar{A} , \bar{B} , \bar{C} a \bar{D} .

$$\begin{bmatrix} \bar{U}_{f1} \\ \bar{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{A} & \bar{B} \\ \bar{C} & \bar{D} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{U}_{f2} \\ \bar{I}_2 \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

$$\bar{A} = 1 + \bar{Z} \cdot \bar{Y} \cdot \frac{l^2}{2} \quad (3.17)$$

$$\bar{B} = \bar{Z} \cdot l \quad (3.18)$$

$$\bar{C} = \bar{Y} \cdot l + \bar{Z} \cdot \bar{Y}^2 \cdot \frac{l^3}{4} \quad (3.19)$$

$$\bar{D} = \bar{A} \quad (3.20)$$

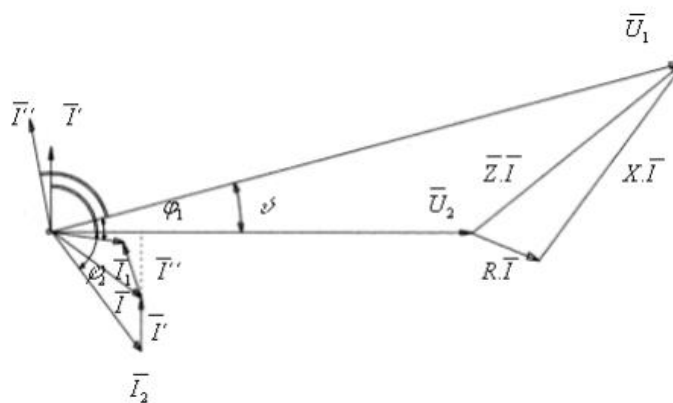
Následně provedu výpočty Blondelových konstant ze známých parametrů a poté dosazením určím vstupní parametry dvojbranu, napětí a proud. Úbytek napětí poté mohu vyjádřit vztahem:

$$\Delta U_f = U_{1f} - U_{2f} \text{ (V)} \quad (3.21)$$

a procentní úbytek napětí na vedení:

$$\Delta u_{\%} = \frac{\Delta U_f}{U_{1f}} \cdot 100 \text{ (\%)} \quad (3.22)$$

U vn vedení není příliš velký rozdíl mezi velikostí R a X, proto nezanedbávám ani jeden z těchto parametrů. Svod G je velmi malý oproti B, proto se i jako v předchozím případě zanedbává. Ve vn sítích při výpočtu v ustáleném bezporuchovém stavu je možné zanedbat i kapacitní susceptanci B, protože proud příčnými admitancemi je zanedbatelný oproti přenášenému provoznímu proudu.



Obrázek 3.3 Fázorový diagram II článku [studijní podklady FEL ZČU]

Z fázorového diagramu lze pak snadno odvodit vztah pro výpočet úbytku napětí:

$$\Delta U_f = R_K \cdot l \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 + X_K \cdot l \cdot I_2 \cdot \sin \varphi_2 + a \text{ (V)} \quad (3.23)$$

- v případě $\cos \varphi_2 > 0,5$ můžeme parametr a zanedbat [7]

3.3 Zkratové poměry na vedení

Každé vedení je potřeba dimenzovat i na účinky zkratových proudů. Zkrat, jako poruchový přechodový děj může vzniknout například spojením jednotlivých fází navzájem nebo se zemí v soustavě s uzemněným uzlem. Následky zkratu se následně projevují jako velké (zkratové) proudy, silové namáhání, nebo výrazné oteplení zařízení.

Pro výpočet zkratových poměrů se vychází z hodnoty rázového zkratového proudu I_K'' ,

$$I_K'' = \frac{c \cdot U_N}{\sqrt{3} \cdot X_C} \quad (A) \quad (3.24)$$

- c – napěťový součinitel
- U_N – jmenovité napětí v místě zkratu
- X_C – celková zkratová reaktance

je to efektivní hodnota střídavé složky zkratového proudu. Velký vliv na její velikost má konfigurace dané sítě charakterizována parametrem X_C , tedy celkovou zkratovou reaktancí sítě. Jednotlivé zkratové reaktance se vypočítají dle vztahů:

- zkratová reaktance elektrizační soustavy

$$X_{ES} = \frac{c \cdot U_N^2}{S_K} \quad (\Omega) \quad (3.25)$$

- c – napěťový součinitel
- U_N – jmenovité napětí soustavy
- S_K – trojfázový zkratový výkon v místě připojení

- zkratová reaktance transformátoru

$$X_T = \frac{u_{k\%}}{100} \cdot \frac{U_N^2}{S_T} \quad (\Omega) \quad (3.26)$$

- $u_{k\%}$ – napětí nakrátko
- U_N – jmenovité napětí transformátoru
- S_T – jmenovitý zdánlivý výkon transformátoru

- zkratová reaktance vedení

$$X_V = X_K \cdot l \quad (\Omega) \quad (3.27)$$

- l – délka vedení
- X_K – reaktance vedení

Celková zkratová reaktance sítě se poté vypočte jako sériově – paralelní řazení prvků dle dané konfigurace sítě.

Jak již bylo řečeno, při zkratu dochází k silovým účinkům zkratového proudu. Zařízení

jsou tedy mechanicky namáhána a mohlo by dojít i k jejich poškození. Proto je potřeba vypočítat dle vztahu (3.28) nárazový zkratový proud, jenž je maximální hodnotou předpokládaného zkratové proudu.

$$I_{km} = K \cdot \sqrt{2} \cdot I_k'' \quad (A) \quad (3.28)$$

- K - činitel, respektující místo zkratu v soustavě
- pro soustavu vn budu uvažovat K=1,6

Při zkratu vznikají i tepelné účinky, které jsou charakterizovány ekvivalentním oteplovacím proudem I_{th} . Je to efektivní hodnota proudu s konstantní amplitudou, který má za dobu trvání zkratu stejné tepelné účinky jako skutečný zkratový proud.

$$I_{th} = k_e \cdot I_k'' \quad (A) \quad (3.29)$$

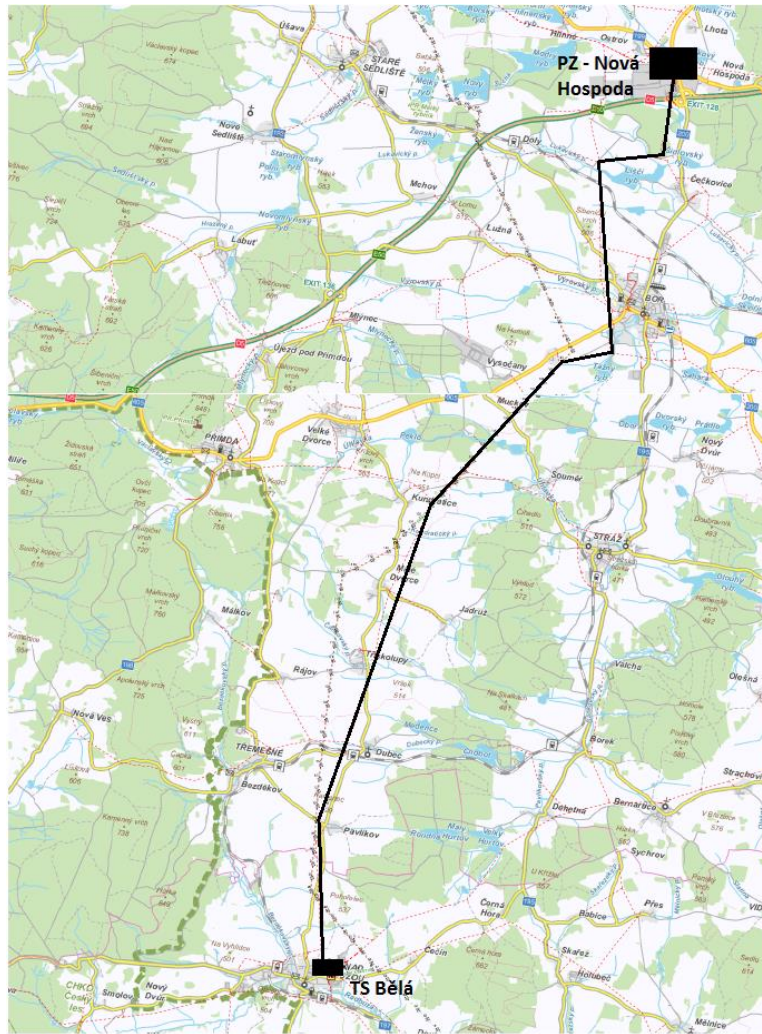
- k_e - koeficient závisící na místě zkratu v soustavě a době trvání zkratu
- pro síť vn a dobu zkratu 0,5s budu uvažovat $k_e=1,02$

3.4 Varianta I

Tato první varianta obsahuje návrh sítě vybudované za účelem rezervy a posílení dodávky elektrické energie pro průmyslovou zónu Nová Hospoda z trafostanice Bělá 110/22 kV.

Ve výpočtech provedu kontrolu na dovolený úbytek napětí pro vodič AlFe 150/25. Následně vypočtu zkratové poměry tohoto vedení.

Jako podpěrné body jsem zvolil betonové sloupy délky 10,5 m a jmenovité vrcholové síly 6 kN, které jsem osadil ocelovou konzolí typu Delta. Sloupy volím s roztečí 80 m. Kotevní stožáry volím po každém cca 1,5 km, pro tento případ příhradový stožár 12 m s vrcholovou silou 40 kN.



Obrázek 3.4 Zjednodušený náhled navrhovaného vedení [mapa vygenerovaná v systému GIS]

Zadané parametry:

$$d = 16,96 \text{ mm}$$

$$S_{mat} = 168,11 \text{ mm}^2$$

$$S_{Al} = 143,4 \text{ mm}^2$$

$$S_{Fe} = 24,71 \text{ mm}^2$$

$$\rho_{Al} = 0,0285 \mu\Omega\text{m}$$

$$\rho_{Fe} = 0,13 \mu\Omega\text{m}$$

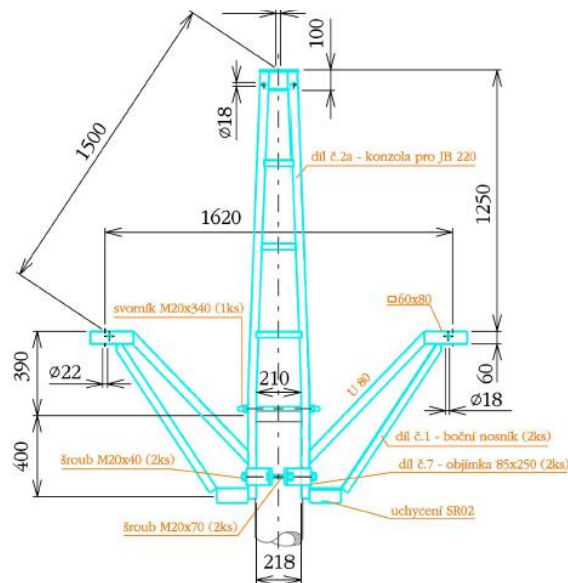
$$l = 18 \text{ km}$$

$$T_1 = 30 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\alpha_{Al} = 0,004 \text{ K}^{-1}$$

$$\alpha_{Fe} = 0,0045 \text{ K}^{-1}$$



Obrázek 3.5 Rozměry konzole Delta [materiál poskytnutý konzultantem]

$$\beta_{Al} = 1,1 \cdot 10^{-6} K^{-1}$$

$$\beta_{Al} = 9 \cdot 10^{-6} K^{-1}T$$

$$h_1 = 9,09 m$$

$$h_2 = 9,09 m$$

$$h_3 = 10,34 m$$

$$d_{12} = 1,62 m$$

$$d_{13} = 1,5 m$$

$$d_{23} = 1,5 m$$

3.4.1 Výpočet parametrů sítě

Nejprve vypočtu odpor lana AlFe 150/25:

$$R_{ssAl} = \rho_{Al} \cdot \frac{l}{S_{Al}} = 0,0285 \cdot \frac{1000}{143,4} = 0,1987 \ (\Omega \cdot km^{-1}) \quad (3.30)$$

$$\begin{aligned} k_{\vartheta} &= 1 + \alpha_{Al}(T_1 - T_0) + \beta_{Al}(T_1 - T_0)^2 = 1 + 0,004(30 - 20) + 1,1 \cdot 10^{-6}(30 - 20)^2 \\ &= 1,04 \end{aligned} \quad (3.31)$$

$$R_{Al} = R_{ssAl} \cdot k_{\vartheta} = 0,1987 \cdot 1,04 = 0,206 \ (\Omega \cdot km^{-1}) \quad (3.32)$$

$$R_{ssFe} = \rho_{Fe} \cdot \frac{l}{S_{Fe}} = 0,13 \cdot \frac{1000}{24,71} = 5,26 \ (\Omega \cdot km^{-1}) \quad (3.33)$$

$$\begin{aligned} k_{\vartheta} &= 1 + \alpha_{Fe}(T_1 - T_0) + \beta_{Fe}(T_1 - T_0)^2 = 1 + 0,0045(30 - 20) + 9 \cdot 10^{-6}(30 - 20)^2 \\ &= 1,046 \end{aligned} \quad (3.34)$$

$$R_{Fe} = R_{ssFe} \cdot k_{\vartheta} = 5,26 \cdot 1,046 = 5,5 \ (\Omega \cdot km^{-1}) \quad (3.35)$$

$$R_{AlFe} = \left(\frac{1}{R_{Al}} + \frac{1}{R_{Fe}} \right)^{-1} = \left(\frac{1}{0,206} + \frac{1}{5,5} \right)^{-1} = 0,198 \ (\Omega \cdot km^{-1}) \quad (3.36)$$

Nyní vypočítám provozní indukčnost a z ní reaktanci vedení, poté dopočtu provozní kapacitu a kapacitní susceptanci.

$$d_s = \sqrt[3]{d_{12}d_{13}d_{23}} = \sqrt[3]{1,62 \cdot 1,5 \cdot 1,5} = 1,54 \text{ (m)} \quad (3.37)$$

$$L_P = 0,46 \cdot \log \frac{d_s}{r} = 0,46 \cdot \log \frac{1,54}{\frac{16,96 \cdot 10^{-3}}{2}} = 1,039 \text{ (mH} \cdot \text{km}^{-1}) \quad (3.38)$$

$$X_P = \omega L_P = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 1,039 \cdot 10^{-3} = 0,326 \text{ (\Omega} \cdot \text{km}^{-1}) \quad (3.39)$$

$$h_s = \sqrt[3]{h_1 \cdot h_2 \cdot h_3} = \sqrt[3]{9,09 \cdot 9,09 \cdot 10,34} = 9,48 \text{ (m)} \quad (3.40)$$

$$\begin{aligned} D &= 41,3 \cdot 10^6 \cdot \log \frac{2h_s}{r} = 41,3 \cdot 10^6 \cdot \log \frac{2 \cdot 9,48}{\frac{16,96 \cdot 10^{-3}}{2}} = \\ &= 138,33 \cdot 10^6 (-) \end{aligned} \quad (3.41)$$

$$\begin{aligned} D' &= 41,3 \cdot 10^6 \cdot \log \frac{\sqrt{4h_s^2 + d_s^2}}{d_s} = 41,3 \cdot 10^6 \cdot \log \frac{\sqrt{4 \cdot 9,48^2 + 1,54^2}}{1,54} \\ &= 48,96 \cdot 10^6 (-) \end{aligned} \quad (3.42)$$

$$C_P = \frac{1}{D - D'} = \frac{1}{138,33 \cdot 10^6 - 48,96 \cdot 10^6} = 11,18 \text{ (nF} \cdot \text{km}^{-1}) \quad (3.43)$$

$$B_P = \omega C_P = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 11,18 \cdot 10^{-9} = 3,51 \cdot 10^{-6} \text{ (S} \cdot \text{km}^{-1}) \quad (3.44)$$

3.4.2 Výpočet úbytku napětí

Z předchozích výpočtů zjistím hodnoty sekundárních parametrů a dosazením do vzorců vypočtu hodnoty Blondelových konstant.

$$\bar{Z} = R_P + jX_P = 0,198 + j0,326 = 0,38 \cdot e^{j58,72^\circ} \quad (3.45)$$

$$\bar{Y} = jB_P = j3,51 \cdot 10^{-6} = 3,51 \cdot 10^{-6} \cdot e^{j90^\circ} \quad (3.46)$$

$$\begin{aligned} \bar{A} &= 1 + \bar{Z} \cdot \bar{Y} \cdot \frac{l^2}{2} = 1 + 0,38 \cdot e^{j58,72^\circ} \cdot 3,51 \cdot 10^{-6} \cdot e^{j90^\circ} \cdot \frac{18^2}{2} \\ &= 0,99 \cdot e^{j6,42 \cdot 10^{-3} \text{°}} \end{aligned} \quad (3.47)$$

$$\bar{B} = \bar{Z} \cdot l = 0,38 \cdot e^{j58,72^\circ} \cdot 18 = 6,84 \cdot e^{j58,72^\circ} \quad (3.48)$$

$$\begin{aligned} \bar{C} &= \bar{Y} \cdot l + \bar{Z} \cdot \bar{Y}^2 \cdot \frac{l^3}{4} \\ &= 3,51 \cdot 10^{-6} \cdot e^{j90^\circ} \cdot 18 + 0,38 \cdot e^{j58,72^\circ} \cdot (3,51 \cdot 10^{-6} \cdot e^{j90^\circ})^2 \cdot \frac{18^3}{4} \\ &= 6,31 \cdot 10^{-5} \cdot e^{j90^\circ} \end{aligned} \quad (3.49)$$

$$\bar{D} = \bar{A} = 0,99 \cdot e^{j6,42 \cdot 10^{-3} \circ} \quad (3.50)$$

Nyní jsem mohl ze znalosti Blondelových konstant a výstupních parametrů dopočítat vstupní hodnoty napětí a proudu.

$$\bar{U}_{2f} = \frac{\bar{U}_2}{\sqrt{3}} = \frac{22 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} = 12701,7 \cdot e^{j0^\circ} \text{ (V)} \quad (3.51)$$

$$\begin{aligned} \bar{I}_{2f} &= \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_S \cdot \cos\varphi} \cdot e^{j\cos^{-1}(\cos\varphi)} = \frac{7 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 22 \cdot 10^3 \cdot 0,95} \cdot e^{j\cos^{-1}(0,95)} \\ &= 193,37 \cdot e^{j-18,19^\circ} \text{ (A)} \end{aligned} \quad (3.52)$$

$$\begin{aligned} \bar{U}_{1f} &= \bar{A} \cdot \bar{U}_{2f} + \bar{B} \cdot \bar{I}_{2f} \\ &= (0,99 \cdot e^{j6,42 \cdot 10^{-3} \circ} \cdot 12701,7 \cdot e^{j0^\circ}) + (6,84 \cdot e^{j58,72^\circ} \cdot 193,37 \\ &\quad \cdot e^{j-18,19^\circ}) = 13579,98 + j860,93 = 13607,24 \cdot e^{j3,62^\circ} \text{ (V)} \end{aligned} \quad (3.53)$$

$$\begin{aligned} \bar{I}_{1f} &= \bar{C} \cdot \bar{U}_{2f} + \bar{D} \cdot \bar{I}_{2f} \\ &= (6,31 \cdot 10^{-5} \cdot e^{j90^\circ} \cdot 12701,7 \cdot e^{j0^\circ}) + (0,99 \cdot e^{j6,42 \cdot 10^{-3} \circ} \cdot 193,37 \\ &\quad \cdot e^{j-18,19^\circ}) = 181,88 - j58,92 = 191,19 \cdot e^{-j17,94^\circ} \text{ (A)} \end{aligned} \quad (3.54)$$

Následně vypočtu procentní úbytek na vedení.

$$\Delta U_f = U_{1f} - U_{2f} = 13607,24 - 12701,7 = 905,54 \text{ (V)} \quad (3.55)$$

$$\Delta u_{\%} = \frac{\Delta U_f}{U_{1f}} \cdot 100 = \frac{905,54}{13607,24} \cdot 100 = 6,65 \% \quad (3.56)$$

Maximální dovolený úbytek pro síť je 10%. Je tedy patrné, že lano AlFe 150/25 při úbytku 6,65% vyhovuje.

3.4.3 Výpočet zkratových proudů

Zadané hodnoty:

$$S_T = 40 \text{ MVA}$$

$$u_{k\%} = 11,5 \%$$

$$S_K = 1386 \text{ MVA}$$

$$U_N = 22 \text{ kV}$$

$$X_K = 0,326 \Omega \cdot \text{km}^{-1}$$

$$l = 18 \text{ km}$$

$$K = 1,6$$

$$k_e = 1,02$$

Při výpočtu zkratových poměrů na vedení je v první řadě nutný výpočet zkratových impedancí jednotlivých prvků na vedení.

$$\begin{aligned} X_{ES(110kV)} &= \frac{c \cdot U_N^2}{S_K} = \frac{1,1 \cdot (110 \cdot 10^3)^2}{1386 \cdot 10^6} = 9,6 \Omega \rightarrow \text{přepočet na } 22 \text{ kV } X_{ES(22kV)} \\ &= 9,6 \cdot \left(\frac{22}{110}\right)^2 = 0,38 (\Omega) \end{aligned} \quad (3.57)$$

$$X_T = \frac{u_{k\%}}{100} \cdot \frac{(U_N)^2}{S_T} = \frac{11,5}{100} \cdot \frac{(22 \cdot 10^3)^2}{40 \cdot 10^6} = 1,39 (\Omega) \quad (3.58)$$

$$X_V = X_K \cdot l = 0,326 \cdot 18 = 5,86 (\Omega) \quad (3.59)$$

Celková zkratová reaktance se následně dle schématu dopočte jako.

$$X_C = X_{ES(22kV)} + X_T + X_V = 0,38 + 1,39 + 5,86 = 7,63 (\Omega) \quad (3.60)$$

Výpočet hodnoty rázového zkratového proudu I_k'' :

$$I_k'' = \frac{c \cdot U_N}{\sqrt{3} \cdot X_C} = \frac{1,1 \cdot 22 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 7,63} = 1831,17 \text{ (A)} \quad (3.61)$$

Rázový zkratový výkon sítě vypočteme jako,

$$S_K'' = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_k'' = \sqrt{3} \cdot 22 \cdot 10^3 \cdot 1831,17 = 69,7 \text{ (MVA)} \quad (3.62)$$

Hodnoty nárazového zkratového proudu I_{km} a ekvivalentního oteplovacího proudu I_{th} jsou,

$$I_{km} = K \cdot \sqrt{2} \cdot I_k'' = 1,6 \cdot \sqrt{2} \cdot 1831,17 = 4143,46 \text{ (A)} \quad (3.63)$$

$$I_{th} = k_e \cdot I_k'' = 1,02 \cdot 1831,17 = 1867,79 \text{ (A)} \quad (3.64)$$

3.5 Varianta II

Tato varianta řeší úpravu již existujícího vedení. Návrh bude zhotoven ze stejného typu lana jako v předchozí variantě, tedy AlFe 150/25. Stožáry budou po celé délce příhradové s konzolí soudek. Jedno vedení bude napájet stávající odběratele a druhé vedení povede přes odbočku k PZ Nová Hospoda. Zvolím stožáry s výškou 15 m a vrcholovou silou 20 kN, rozteč mezi nimi 130 m. Každý dvanáctý stožár bude kotevní s parametry 15 m a 60 kN.

Zadané parametry:

$$d = 16,96 \text{ mm}$$

$$S_{mat} = 168,11 \text{ mm}^2$$

$$S_{Al} = 143,4 \text{ mm}^2$$

$$S_{Fe} = 24,71 \text{ mm}^2$$

$$\rho_{Al} = 0,0285 \text{ } \mu\Omega\text{m}$$

$$\rho_{Fe} = 0,13 \text{ } \mu\Omega\text{m}$$

$$l = 18 \text{ km}$$

$$T_1 = 30 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_0 = 20 \text{ °C}$$

$$\alpha_{Al} = 0,004 \text{ K}^{-1}$$

$$\alpha_{Fe} = 0,0045 \text{ K}^{-1}$$

$$\beta_{Al} = 1,1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$$

$$\beta_{Al} = 9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$$

$$h_1 = 10,2 \text{ m}$$

$$h_2 = 11,6 \text{ m}$$

$$h_3 = 13 \text{ m}$$

$$d_{12} = 1,49 \text{ m}$$

$$d_{13} = 2,8 \text{ m}$$

$$d_{23} = 1,56 \text{ m}$$

3.5.1 Výpočet parametrů sítě

Odpor AlFe lana 150/25 budu uvažovat stejný jako v první variantě, tedy:

$$R_{AlFe} = 0,198 \text{ } (\Omega \cdot \text{km}^{-1}) \quad (3.65)$$

Avšak pro výpočet provozní indukčnosti musím již uvažovat fakt, že vedení je dvojité na konzoli typu soudek. Dojde tedy k malé úpravě vztahu pro střední vzdálenost vodičů.

$$d_s = \frac{\sqrt[3]{d_{12}d_{13}d_{23}} \cdot \sqrt[3]{d_{12}d_{13}d_{23}}}{\sqrt[3]{d_{11}d_{22}d_{33}}} = \frac{\sqrt[3]{1,95 \cdot 3,7 \cdot 2,04} \cdot \sqrt[3]{4,16 \cdot 4,76 \cdot 4,2}}{\sqrt[3]{3 \cdot 4,5 \cdot 3}} = 3,11 \text{ (m)} \quad (3.66)$$

$$L_P = 0,46 \cdot \log \frac{d_s}{r} = 0,46 \cdot \log \frac{3,11}{\frac{16,96 \cdot 10^{-3}}{2}} = 1,179 \text{ (mH} \cdot \text{km}^{-1}) \quad (3.67)$$

$$X_P = \omega L_P = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 1,077 \cdot 10^{-3} = 0,37 \text{ } (\Omega \cdot \text{km}^{-1}) \quad (3.68)$$

I při výpočtu kapacitní susceptance, je potřeba přepočítat střední výšku vodičů nad zemí.

$$h_s = \sqrt[3]{h_1 \cdot h_2 \cdot h_3} = \sqrt[3]{12,3 \cdot 10,5 \cdot 8,6} = 10,35 \text{ (m)} \quad (3.69)$$

Dále jsem vypočetl potenciálové součinitele.

$$D = 41,3 \cdot 10^6 \cdot \log \frac{2h_s}{r} = 41,3 \cdot 10^6 \cdot \log \frac{2 \cdot 10,35}{\frac{16,96 \cdot 10^{-3}}{2}} =$$

$$= 139,9 \cdot 10^6 (-) \quad (3.70)$$

$$D' = 41,3 \cdot 10^6 \cdot \log \frac{\sqrt{4h_s^2 + d_s^2}}{d_s} = 41,3 \cdot 10^6 \cdot \log \frac{\sqrt{4 \cdot 10,35^2 + 3,11^2}}{3,11}$$

$$= 34,2 \cdot 10^6 (-) \quad (3.71)$$

Nyní již mohu dopočítat hodnotu provozní kapacity, a tedy i kapacitní susceptanci daného vedení.

$$C_p = \frac{1}{D - D'} = \frac{1}{139,9 \cdot 10^6 - 34,2 \cdot 10^6} = 9,46 \text{ (nF} \cdot \text{km}^{-1}) \quad (3.72)$$

$$B_p = \omega C_p = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 9,46 \cdot 10^{-9} = 2,97 \cdot 10^{-6} \text{ (S} \cdot \text{km}^{-1}) \quad (3.73)$$

3.5.2 Výpočet úbytku napětí

Následně budu postupovat stejně jako v první variantě. Dopočtu sekundární parametry z výše uvedených hodnot a poté pro ně vypočtu jednotlivé hodnoty Blondelových konstant.

$$\bar{Z} = R_p + jX_p = 0,198 + j0,37 = 0,42 \cdot e^{j61,84^\circ} \quad (3.74)$$

$$\bar{Y} = jB_p = j2,97 \cdot 10^{-6} = 2,97 \cdot 10^{-6} \cdot e^{j90^\circ} \quad (3.75)$$

$$\bar{A} = 1 + \bar{Z} \cdot \bar{Y} \cdot \frac{l^2}{2} = 1 + 0,42 \cdot e^{j61,84^\circ} \cdot 2,97 \cdot 10^{-6} \cdot e^{j90^\circ} \cdot \frac{18^2}{2}$$

$$= 0,99 \cdot e^{j5,51 \cdot 10^{-3} \text{°}} \quad (3.76)$$

$$\bar{B} = \bar{Z} \cdot l = 0,42 \cdot e^{j61,84^\circ} \cdot 18 = 7,56 \cdot e^{j61,84^\circ} \quad (3.77)$$

$$\begin{aligned}\bar{C} &= \bar{Y} \cdot l + \bar{Z} \cdot \bar{Y}^2 \cdot \frac{l^3}{4} \\ &= 2,97 \cdot 10^{-6} \cdot e^{j90^\circ} \cdot 18 + 0,42 \cdot e^{j61,84^\circ} \cdot (2,97 \cdot 10^{-6} \cdot e^{j90^\circ})^2 \cdot \frac{18^3}{4} \\ &= 9,12 \cdot 10^{-4} \cdot e^{j90^\circ}\end{aligned}\quad (3.78)$$

$$\bar{D} = \bar{A} = 0,99 \cdot e^{j5,51 \cdot 10^{-3} \text{ rad}} \quad (3.79)$$

Nyní ze znalosti Blondelových konstant a výstupních parametrů, které jsou totožné s hodnotami v první variantě dopočtu vstupní hodnoty napětí a proudu.

$$\bar{U}_{2f} = 12701,7 \cdot e^{j0^\circ} \text{ (V)} \quad (3.80)$$

$$\bar{I}_{2f} = 193,37 \cdot e^{j-18,19^\circ} \text{ (A)} \quad (3.81)$$

$$\begin{aligned}\bar{U}_{1f} &= \bar{A} \cdot \bar{U}_{2f} + \bar{B} \cdot \bar{I}_{2f} \\ &= (0,99 \cdot e^{j5,51 \cdot 10^{-3} \text{ rad}} \cdot 12701,7 \cdot e^{j0^\circ}) + (7,56 \cdot e^{j61,84^\circ} \cdot 193,37 \\ &\quad \cdot e^{j-18,19^\circ}) = 13632,4 + j1010,2 = 13669,78 \cdot e^{j4,23^\circ} \text{ (V)}\end{aligned}\quad (3.82)$$

$$\begin{aligned}\bar{I}_{1f} &= \bar{C} \cdot \bar{U}_{2f} + \bar{D} \cdot \bar{I}_{2f} \\ &= (9,12 \cdot 10^{-4} \cdot e^{j90^\circ} \cdot 12701,7 \cdot e^{j0^\circ}) + (0,99 \cdot e^{j5,51 \cdot 10^{-3} \text{ rad}} \cdot 193,37 \\ &\quad \cdot e^{j-18,19^\circ}) = 181,84 - j48,14 = 188,1 \cdot e^{-j14,82^\circ} \text{ (A)}\end{aligned}\quad (3.83)$$

Následně vypočtu procentní úbytek na vedení.

$$\Delta U_f = U_{1f} - U_{2f} = 13669,78 - 12701,7 = 968,08 \text{ (V)} \quad (3.84)$$

$$\Delta u_{\%} = \frac{\Delta U_f}{U_{1f}} \cdot 100 = \frac{968,08}{13669,78} \cdot 100 = 7,08 \% \quad (3.85)$$

I v tomto návrhu je patrné, že při úbytku 7,08% lano AlFe 150/25 vyhovuje.

3.5.3 Výpočet zkratových proudů

Při výpočtu zkratových poměrů ve druhé variantě je většina zadaných hodnot stejných, pouze je potřeba uvažovat jinou reaktanci vedení X_K .

Zadané hodnoty:

$$S_T = 40 \text{ MVA}$$

$$u_{K\%} = 11,5 \%$$

$$S_K = 1386 \text{ MVA}$$

$$U_N = 22 \text{ kV}$$

$$X_K = 0,37 \Omega \cdot \text{km}^{-1}$$

$$l = 18 \text{ km}$$

$$K = 1,6$$

$$k_e = 1,02$$

U výpočtů zkratových reaktancí je tedy zapotřebí přepočítat pouze hodnotu zkratové reaktance pro vedení. Ostatní hodnoty zůstávají stejné.

$$X_{ES(22kV)} = 0,38 (\Omega) \quad (3.86)$$

$$X_T = 1,39 (\Omega) \quad (3.87)$$

$$X_V = X_K \cdot l = 0,37 \cdot 18 = 6,66 (\Omega) \quad (3.88)$$

Celková zkratová reaktance je tedy.

$$X_C = X_{ES(22kV)} + X_T + X_V = 0,38 + 1,39 + 6,66 = 8,43 (\Omega) \quad (3.89)$$

Výpočet hodnoty rázového zkratového proudu I_K'' ,

$$I_K'' = \frac{c \cdot U_N}{\sqrt{3} \cdot X_C} = \frac{1,1 \cdot 22 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 8,43} = 1657,4 \text{ (A)} \quad (3.90)$$

Rázový zkratový výkon sítě vypočtu jako,

$$S''_K = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I''_K = \sqrt{3} \cdot 22 \cdot 10^3 \cdot 1657,4 = 63,15 \text{ (MVA)} \quad (3.91)$$

Hodnoty nárazového zkratového proudu I_{km} a ekvivalentního oteplovacího proudu I_{th} jsou,

$$I_{km} = K \cdot \sqrt{2} \cdot I''_k = 1,6 \cdot \sqrt{2} \cdot 1657,4 = 3750,3 \text{ (A)} \quad (3.92)$$

$$I_{th} = k_e \cdot I''_k = 1,02 \cdot 1657,4 = 1690,5 \text{ (A)} \quad (3.93)$$

4 Porovnání variant z technického a ekonomického hlediska

V této kapitole se budu věnovat porovnání obou variant návrhu z technického i ekonomického hlediska. V tabulce č. 2 jsou shrnuty základní parametry, které jsem v předchozí kapitole vypočetl pro obě varianty. Při porovnání hodnot indukční reaktance a kapacitní susceptance je patrný rozdíl, ten je dán odlišnou konstrukcí těchto vedení, konkrétně použitým typem konzole a výškou stožáru. Z technického hlediska je nejdůležitějším parametrem procentní úbytek napětí. V první variantě, s betonovými sloupy, vyšel 6,65 %, což je o trochu méně než při návrhu na příhradových stožárech, tedy 7,08%. Druhá varianta je schopna, díky své konstrukci, lépe odolávat účinkům zkratového proudu.

Tabulka 2 Shrnutí výsledků

	R_{AlFe} ($\Omega \cdot km^{-1}$)	X_p ($\Omega \cdot km^{-1}$)	B_p ($S \cdot km^{-1}$)	U_{If} (V)	I_{If} (A)	$\Delta u\%$ (%)	I''_K (A)	S''_K (MVA)
Varianta I	0,198	0,326	$3,51 \cdot 10^{-6}$	13607,2	191,19	6,65	1831,2	69,7
Varianta II	0,198	0,37	$2,97 \cdot 10^{-6}$	13669,8	188,1	7,08	1657,4	63,15

Z ekonomického hlediska (viz Tabulka 3) je zřejmé, že nejlevnější je první varianta s betonovými sloupy. Je potřeba však uvážit, že druhá varianta je provedena jako dvojitě vedení, což podstatně ovlivňuje výběr stožáru, typ konzole a její uchycení na dřík stožáru.

Tabulka 3 Finanční náklady

	Délka vedení (km)	Počet podpěrných bodů	Rozpětí pole (m)	Cena vedení za km	Celková cena vedení (Kč)
Varianta I	18	225	80	1 009 937	18 178 866
Varianta II	18	139	130	2 699 034	48 582 612

Závěr

Cílem této práce bylo nastínit problematiku provozu distribuční soustavy, která je nedílnou součástí elektrizační soustavy, tudíž je na ní kladen velký důraz, zejména na spolehlivost provozu a její bezpečnost.

V začátku teoretické části jsem se věnoval způsobům provozu soustavy z pohledu rozvodu elektrické energie a také spojení nulového bodu soustavy se zemí. Za nejspolehlivější rozvod je považován uzavřený mřížový, který zaručuje napájení odběrného místa ze dvou a více směrů. To je ovšem podmíněno vysokou pořizovací cenou. Kompromisem mezi cenou a spolehlivostí provozu je jednoznačně uzavřený okružní rozvod, jehož velkou výhodou je možnost napájení jednoho okruhu ze dvou stran. V případě poruchy se tento okruh bude provozovat jako dva paprsky. Okružní rozvody se nejvíce vyskytují na napěťové hladině 110 kV, neboť tato hladina slouží především jako propojení přenosové soustavy s distribučními rozvodnami, je tedy na ní kladen velký důraz ohledně spolehlivosti. Pro přenos elektrické energie do měst a obcí se nejčastěji využívá paprskový rozvod.

Volba systému uzemnění značně ovlivňuje velikost poruchového proudu. Při spojení jedné fáze se zemí u účinně uzemněných sítí se jedná o jednofázový zkrat. Pokud však dojde k takové poruše u sítí neúčinně uzemněných nebo izolovaných dochází k tzv. zemnímu spojení. V takových sítích poruchové proudy nedosahují tak vysokých hodnot, není tedy nutnost okamžitého odpojení sítě. Vzhledem k velké rozloze a členitosti distribuční soustavy v České republice, jsou soustavy vystaveny mnoha nepříznivým vlivům. Proto se nejčastěji distribuční vedení provozují jako sítě neúčinně uzemněné přes zhášecí tlumivku, tedy kompenzované.

V další kapitole se zmiňuji o konstrukčních prvcích na distribučních vedeních. Pro venkovní vedení jsou nejdůležitější podpěrné body, které nesou celé vedení. Nejčastěji se používají betonové sloupy osazené konzolemi typu Pařát nebo Delta, a také příhradové stožáry s konzolí Soudek. Vodičem u venkovních distribučních vedení jsou nejčastěji holá AlFe lana z hliníkových prutů slaněných okolo ocelového jádra upevněna ke konzoli stožáru pomocí vhodného izolátoru.

Dále se na spolehlivém a bezporuchovém provozu vedení podílí ochranné prvky, které nám brání anebo omezují vznik možných nežádoucích jevů. Pro ovládání vedení, zapnutí nebo odpojení, slouží spínací prvky. Nejdůležitějšími jsou výkonový vypínač, který umožňuje vypínat zkratové proudy a odpojovač pro viditelné a bezpečné odpojení sítě od

zdroje.

V praktické části jsem se věnoval návrhu sítě vn 22 kV pro napájení průmyslové zóny Nová Hospoda z nedaleké rozvodny Bělá. Byly navrženy dvě možné varianty, přičemž cílem bylo zjistit změnu parametrů sítě při rozdílných provedeních. U každé z nich jsem pomocí jednoduchých vztahů vypočetl parametry daného vedení, ze kterých jsem určil Blondelovy konstanty. Následně jsem spočítal napěťové poměry na vedení, zvláště procentní úbytek napětí, který je při návrhu jakéhokoliv vedení rozhodujícím parametrem, zda dané vedení vyhovuje. Na závěr každého návrhu jsem zjistil zkratové poměry na vedení, a to rázový zkratový proud, zkratový výkon a proudy charakterizující dynamické a tepelné účinky zkratového proudu.

První varianta představuje vybudování zcela nového vedení od rozvodny Bělá k přípojce průmyslové zóny. Toto vedení o délce 18 km jsem navrhl na podpěrných betonových sloupech o výšce 10,5 m a vrcholovou silou 6 kN. Tyto sloupy jsem osadil ocelovými konzolami typu Delta a rozteč mezi sloupy jsem zvolil 80 m. Kotevní stožáry, vysoké 12 m s vrcholovou silou 40 kN, jsem umístil po každém 1,5 km a také při každém přechodu přes železniční trať nebo pozemní komunikaci.

Jako vodič bylo použito AlFe lano 150/25, s nímž jsem dospěl k hodnotě procentního úbytku napětí 6,65%. Je tedy patrné, že tato varianta s betonovými sloupy vyhovuje.

V druhém případě, jsem se věnoval kompletní rekonstrukci již existujícího vedení. Musel jsem si tedy určit podpěrné body a konzole pro dvojité vedení, kdy jedno vedení bude napájet stávající odběry a druhé vedení bude sloužit pouze pro napájení PZ Nová Hospoda. Pro toto dvojité vedení jsem zvolil příhradové stožáry výšky 15 m a vrcholové síly 20 kN. Kotevní stožáry byly vysoké 15 m a vrcholové síly 60 kN. Rozteč mezi stožáry jsem oproti první variantě zvolil 130 m, a to na základě vyšší vrcholové síly. Zvoleným typem konzole v této variantě byl Soudek. I zde jsem použil délku vedení 18 km a typ vodiče byl také stejný, tedy lano AlFe 150/25. Tento postup jsem zvolil proto, aby byly zřetelné změny při volbě odlišných podpěrných bodů a konzol.

Z výpočtů jsem zjistil, že volbou příhradových stožárů a konzol typu Soudek pro dvojité vedení se změnila parametry induktivní reaktance a kapacitní susceptance. To bylo zapříčiněno, v porovnání s první variantou, zvětšením střední vzdálenosti mezi vodiči a zvětšením střední výšky vodičů nad zemí. Pro tento návrh jsem dopočítal procentní úbytek napětí 7,08%, což je i v tomto případě vyhovující.

V závěru práce jsem obě varianty vedení porovnal z technického a ekonomického hlediska.

Z výpočtů je patrné, že menšího úbytku napětí dosahuje vedení na betonových sloupech, avšak při porovnání s dvojitým vedením na příhradových stožárech nelze přímo určit, zda je toto vedení vhodnější variantou. Nižší hodnoty rázového zkratového proudu a zkratového výkonu jsem vypočítal u vedení s příhradovými stožáry. To bylo dáno vyšší induktivní reaktancí a tedy i vyšší celkovou zkratovou reaktancí, oproti vedení na betonových sloupech.

Při porovnání cen jednotlivých výstaveb vedení, je již zcela patrné, že z ekonomického pohledu bude výhodnější vybudování zcela nového vedení na betonových sloupech, neboť druhá varianta návrhu vedení s příhradovými stožáry je skoro 2,5 násobně dražší. U druhé varianty je dokonce ještě nutné započítat i předchozí demontáž již existujícího vedení. Avšak je potřeba i zvážit možný ekologický dopad v případě realizace první varianty, v takovém případě bych se i za vysokou pořizovací cenu přiklonil k výstavbě dvojitého vedení na příhradových stožárech.

Seznam použité literatury

- [1] MERTLOVÁ, Jiřina a Martin KOČMICH. *Elektrické stanice a vedení*. Vyd. 2., upr. Plzeň: Západočeská univerzita, 1997. ISBN 80-708-2356-9.
- [2] SCHEJBAL, Konstantin a Jiřina MERTLOVÁ. *Elektroenergetika II*. Plzeň: Západočeská univerzita, 1998. ISBN 80-708-2451-4.
- [3] TESAŘOVÁ, Miloslava a Jiřina MERTLOVÁ. *Průmyslová elektroenergetika*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000. ISBN 80-708-2703-3.
- [4] MATĚNA, Štěpán, Milan TŮMA a Jiří BRAUNER. *Výroba a rozvod elektrické energie*. 2., upr. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1978. Řada elektrotechnické literatury.
- [5] MERTLOVÁ, Jiřina a Lucie NOHÁČOVÁ. *Elektrické stanice a vedení*. V Plzni: Západočeská univerzita, Fakulta elektrotechnická, 2008. ISBN 978-80-7043-724-7.
- [6] ŠTROBLOVÁ, Milada. *Elektrické sítě městské a průmyslové*. Plzeň: Západočeská univerzita, 1994. ISBN 80-708-2154-X.
- [7] MERTLOVÁ, Jiřina, Pavla HEJTMÁNKOVÁ a Tomáš TAJTL. *Teorie přenosu a rozvodu elektrické energie*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2004. ISBN 80-704-3307-8.
- [8] TOMAN, Petr, Jiří DRÁPELA, Stanislav MIŠÁK, Jaroslava ORSÁGOVÁ, Martin PAAR a David TOPOLÁNEK. *Provoz distribučních soustav* [online]. [cit. 2017-05-12]. DOI: 978-80-01-04935-8. ISBN 978-80-01-04935-8.
- [9] *Technická politika - rozvoj distribučních sítí a technologických prvků v DSO* [online]. , 12 [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: www.cezdistribuce.cz/edee/content/file-other/distribuce/technicke./priloha-5.doc

- [10] BUREŠ, Zdeněk, Petr ŠITINA a Jan VÁCLAVEK. *Navrhování venkovních vedení vn a nn*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1989. Praktické elektrotechnické příručky.
- [11] *Pravidla provozování distribučních soustav* [online]. , 80 [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: http://www.cezdistribuce.cz/edee/content/file-other/distribuce/energeticka-legislativa/ppds/2016/ppds_2016.pdf
- [12] ČERMÁK, Jiří. *Vodiče venkovních elektrických vedení* [online]. , 1 [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/technologie/elektroenergetika/vodice-venkovnich-elektrickych-vedeni/>
- [13] *Víte, co to je a jak funguje smart grid?* [online]. , 1 [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://www.proelektrotechniky.cz/vzdelavani/22.php>
- [14] MOLEK, Tomáš. *Smart region Vrchlabí - první česká chytrá síť* [online]. , 1 [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/elektrina/smart-region-vrchlabi-prvni-ceska-chytra-sit/>
- [15] PROCHÁZKA, Radek. *Druhy elektrického silnoprůdého rozvodu* [online]. , 1 [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://elektro.tzb-info.cz/teorie-elektrotechnika/4035-druhy-elektrickeho-silnoprudeho-rozvodu>
- [16] KARADY, George G. a Keith E. HOLBERT. *Electrical energy conversion and transport: an interactive computer-based approach*. 2nd ed. Hoboken, N.J.: Wiley, 2005. ISBN 04-714-7652-8.
- [17] HARLOW, James H. a Keith E. HOLBERT. *Electric power transformer engineering: an interactive computer-based approach*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, c2007. ISBN 978-084-9391-866.
- [18] *IVEP: Venkovní odpínače, úsečníky a odpojovače* [online]. [cit. 2017-06-01]. Dostupné z: <http://www.ivep.cz/cz/produkty/venkovni-odpinace-usecniky-a-odpojovace>

- [19] ACCR lana řeší energetické přetížení sítí [online]. [cit. 2017-06-01]. Dostupné z: <http://www.etm.cz/index.php/etm/677-accr-lana-resi-energeticke-pretizeni-siti>
- [20] KOBRLÉ, Pavel. *Elektrické přístroje*. Ústí nad Labem, 2014.
- [21] TESAŘOVÁ, Miloslava. *Napěťové poměry v distribuční soustavě* [online]. , 15 [cit. 2017-06-01]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~tesarova/PE/Soubory/Kap4.pdf>
- [22] IVEP: *Tahové, podpěrné a staniční izolátory* [online]. [cit. 2017-06-01]. Dostupné z: <http://www.ivep.cz/cz/produkty/tahove-podperne-a-stanicni-izolatory>
- [23] ČERMÁK, Jiří. *Elektrické stožáry aneb poznáš kočku na poli?* [online]. [cit. 2017-06-01]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/technologie/elektroenergetika/elektricke-stozary-aneb-poznas-kocku-na-poli/>
- [24] PAVLÍČEK, Martin Pavlíček. *Skupina ČEZ investuje do ochrany ptactva v regionu středních Čech* [online]. [cit. 2017-06-01]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/pro-media/tiskove-zpravy/2232.html>
- [25] *Koncepce venkovních sítí vn. ČEZ Distribuce, a. s., 2016.*