

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Spolehlivé zabezpečení dodávky elektrické energie  
v průmyslové zóně Kostelec u Stříbra**

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Martin LEVKO**

Osobní číslo: **E17N0081P**

Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**

Studijní obor: **Elektroenergetika**

Název tématu: **Spolehlivé zabezpečení dodávky elektrické energie  
v průmyslové zóně Kostelec u Stříbra**

Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

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

Diplomová práce "Spolehlivé zabezpečení dodávky elektrické energie v průmyslové zóně Kostelec u Stříbra" bude zaměřena na tyto body:

1. Provedte analýzu stávajícího způsobu zásobování rozvíjející průmyslové zóny a sumarizujte požadavky na připojení nových odběrných míst.
2. Navrhněte varianty řešení požadavků na nová připojení.
3. Provedte výběr optimální varianty s ohledem na bilanci, spolehlivost dodávky a očekávaný další rozvoj.
4. Pro zvolenou variantu vypracujte návrh technického řešení včetně výpočtu základních parametrů.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **40 - 60 stran**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. Skripta a přednášky k předmětu "Energetika I" a "Elektrické přístroje".
2. **www stránky: ERU, OTE, Provozovatelé regionálních DS, European commission - Proposals on clean energy for all Europeans.**
3. **Zákon č. 458/2000 Sb. o podmínkách podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích a o změně některých zákonů (energetický zákon).**
4. **Vyhláška č. 16/2016 Sb. o podmínkách připojení k elektrizační soustavě.**
5. **Pravidla provozování distribučních soustav (ČEZd, EONd, PREDi).**

Vedoucí diplomové práce:

**Doc. Ing. Lucie Noháčová, Ph.D.**


Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce:


**5. října 2018**

Termín odevzdání diplomové práce:

**30. května 2019**



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



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

V Plzni dne 5. října 2018

## **Abstrakt**

Předmětem této diplomové práce je zajistit spolehlivé zásobování průmyslové zóny z distribuční sítě vysokého napětí. Průmyslová zóna je ve fázi rozvoje a od tamních odběratelů se očekává výrazný nárůst rezervovaného příkonu. Mým cílem je analyzovat stávající stav distribuční soustavy a s ohledem na očekávaný rozvoj průmyslové zóny navrhnout několik možných úprav distribuční soustavy. Na základě technicko-ekonomického hodnocení vyberu optimální způsob zásobování zóny a popíšu jej.

## **Klíčová slova**

Průmyslová zóna, distribuční soustava, vysoké napětí, transformovna, transformátor, vedení, připojování, rezervovaný příkon, rezervovaná kapacita, zásobování, napájení, ekonomické hodnocení, odchylka napětí, zkrat.

## **Abstract**

The subject of this master thesis is to ensure reliable supply of electricity in industrial zone from high voltage distribution grid. The industrial zone is in the development so we can expect rapid increase of power demand. My goal is to analyze the current state of distribution grid. Then I have to suggest possible modifications of grid while respecting expected development of industrial zone. I choose the optimal method of electricity supply on the basis of technical-economic evaluation. Next I describe this method.

## **Key words**

Industrial zone, electric power distribution, high voltage, substation, transformer, overhead power line, connecting, maximum possible load, power demand, electricity provision, supply, economic evaluation, voltage drop, short circuit.

## **Prohlášení**

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

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

.....  
podpis

V Plzni dne 30.5.2019

Bc. Martin Levko

## **Poděkování**

Tímto bych chtěl poděkovat doc. Ing. Lucii Noháčové, Ph.D. za ochotu při volbě zadání a následné příkladné vedení diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Václavu Kropáčkovi, Ph.D. z ČEZ Distribuce, a.s. za poskytnutá data a cenné informace z praxe, bez nichž bych diplomovou práci nemohl vypracovat a zejména za čas, který navzdory svému nabitému programu věnoval mým konzultacím. Také bych rád poděkoval mé rodině za dlouhodobou podporu při studiu.

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>11</b>
SEZNAM FYZIKÁLNÍCH VELIČIN.....	11
SEZNAM ZKRATEK.....	13
<b>1 PŘIPOJENÍ PRŮMYSLOVÉHO ZÁVODU K ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVĚ</b> .....	<b>14</b>
1.1 ELEKTRINA A PRŮMYSL.....	14
1.2 VOLBA NAPĚŤOVÉ HLADINY.....	15
1.3 ŽÁDOST O PŘIPOJENÍ.....	17
1.4 PROVEDENÍ PŘIPOJENÍ.....	18
1.4.1 Přípojky provedené venkovním vedením.....	18
1.4.2 Přípojky provedené kabelovým vedením.....	18
<b>2 STÁVAJÍCÍ ZPŮSOB ZÁSOBOVÁNÍ EL. ENERGIÍ</b> .....	<b>20</b>
2.1 POPIS VYBRANÉ PRŮMYSLOVÉ ZÓNY.....	20
2.2 MOŽNÉ ZPŮSOBY ZÁSOBOVÁNÍ EL. ENERGIÍ.....	21
2.2.1 Kritérium pro stanovení výchozího způsobu zásobování.....	24
2.2.2 Napájení z transformovny Bělá.....	25
2.2.3 Napájení z transformovny Tachov.....	25
2.2.4 Napájení z transformovny Stříbro.....	26
<b>3 ŘEŠENÍ POŽADAVKŮ NA PŘIPOJENÍ</b> .....	<b>27</b>
3.1 ŘEŠENÍ Z HLEDISKA VOLNÉ DISTRIBUČNÍ KAPACITY.....	27
3.2 VÝSTAVBA NOVÉ TRANSFORMOVNY.....	28
3.2.1 Důvody výstavby nové transformovny.....	28
3.2.2 Lokalita nové transformovny.....	29
3.2.3 Charakteristika nové transformovny.....	30
<b>4 VOLBA PŘECHODNÉHO ŘEŠENÍ POŽADAVKŮ NA PŘIPOJENÍ</b> .....	<b>34</b>
4.1 ŘEŠENÍ Z HLEDISKA NAPĚŤOVÝCH POMĚRŮ.....	34
4.1.1 Varianta 1.....	35
4.1.2 Varianta 2.....	40
4.1.3 Varianta 3.....	41
4.1.4 Varianta 4.....	42
4.1.5 Varianta 5.....	44
4.2 ŘEŠENÍ Z HLEDISKA EKONOMICKÉHO.....	46
4.2.1 Základní ekonomické pojmy.....	46
4.2.2 Postup výpočtu ekonomické efektivity.....	48
4.2.3 Výpočet ekonomické efektivity jednotlivých variant.....	52
4.3 VOLBA OPTIMÁLNÍ VARIANTY.....	58
<b>5 VÝPOČET ZKRATOVÝCH POMĚRŮ</b> .....	<b>59</b>
5.1 STÁVAJÍCÍ ZPŮSOB ZÁSOBOVÁNÍ.....	60
5.2 PŘECHODNÝ ZPŮSOB ZÁSOBOVÁNÍ (VARIANTA 3).....	62
5.2.1 Zásobování pomocí vývodu Tachov.....	62
5.2.2 Zásobování pomocí vývodu Bor.....	62
5.3 FINÁLNÍ ZPŮSOB ZÁSOBOVÁNÍ (NOVÁ TRANSFORMOVNA).....	63
5.4 SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ.....	65
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>66</b>



<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....</b>	<b>68</b>
<b>PŘÍLOHY .....</b>	<b>1</b>

## Úvod

Předmětem této diplomové práce je návrh napájení průmyslové zóny, ke kterému nahlížím pohledem provozovatele distribuční soustavy.

V první kapitole nejprve zmiňuji historickou provázanost průmyslu a oboru elektroenergetiky. Následně se věnuji legislativním náležitostem, které doprovázející připojování průmyslových objektů k distribuční soustavě, a rovněž technickým aspektům připojení, jakými jsou volba napěťové hladiny připojení a způsob provedení přípojky.

Dále se již zabývám řešenou průmyslovou zónou, která je v druhé kapitole stručně popsána. Tato část práce obsahuje představení způsobu zásobování stávajících objektů v průmyslové zóně včetně charakteristik elektroenergetických prvků, kterými disponuje provozovatel distribuční soustavy.

Třetí a čtvrtá kapitola obsahuje řešení nových požadavků na připojení odběratelů v průmyslové zóně. Současná situace v distribuční soustavě vyžaduje nejprve volbu přechodného a poté finálního řešení. Optimální řešení zvolím na základě porovnání pěti variant napájení průmyslové zóny. Při výběru uplatním technické i ekonomické hledisko.

Konkrétní provedení vybraných řešení bude dostatečně objasněno již při samotné volbě optimální varianty. Proto se v závěru diplomové práce zaměřím na základní výpočty, kterými bude výpočet zkratových poměrů.

## Seznam symbolů a zkratek

### Seznam fyzikálních veličin

$p_s$ .....	měrný činný výkon na jednotku plochy ( $\text{MW} \cdot \text{ha}^{-1}$ )
$P_{\text{rez}}$ .....	rezervovaný činný příkon (MW)
$S_{\text{pz}}$ .....	plocha průmyslové zóny (ha)
$\Delta P_{\text{rez}}$ .....	nárůst rezervovaného činného příkonu (MW)
$\cos \varphi$ .....	účinník (-)
$\Delta U$ .....	úbytek sdruženého napětí (V)
$l$ .....	délka vedení (km)
$I$ .....	elektrický proud (A)
$R_p$ .....	provozní činný odpor ( $\Omega \cdot \text{km}^{-1}$ )
$X_p$ .....	provozní reaktance ( $\Omega \cdot \text{km}^{-1}$ )
$z_{\%}$ .....	procentní zatížení transformátoru (%)
$S_p$ .....	výpočtový zdánlivý výkon (MVA)
$P_p$ .....	výpočtový činný výkon (MW)
$S_T$ .....	jmenovitý výkon transformátoru (MVA)
$\Delta P_0$ .....	činné ztráty naprázdno (kW)
$\Delta P_k$ .....	činné ztráty nakrátko (kW)
$S_{\text{hosp}}$ .....	hospodárný zdánlivý výkon skupiny transformátorů (MVA)
$S$ .....	velikost průřezu vodiče ( $\text{mm}^2$ )
$I_{\text{dov}}$ .....	jmenovitý (dovolený) proud vodičem (A)
$P$ .....	činný výkon (kW)
$Q$ .....	jalový výkon (kVAr)
$I_{\xi}$ .....	činná složka proudu (A)
$I_j$ .....	jalová složka proudu (A)
$U_n$ .....	jmenovité sdružené napětí (kV)
$U_{\text{min}}$ .....	nejnižší sdružené napětí na vývodu (kV)
$U_{\text{nap}}$ .....	sdružené napětí na přípojnicích elektrické stanice (kV)

$i$	úsek vedení (-)
$t$	čas (rok)
$CF$	cash flow (Kč)
$V$	výnosy (Kč)
$N_p$	provozní náklady (Kč)
$N_i$	investiční náklady (Kč)
$D$	daň z příjmu (Kč)
$P$	podíl zákazníka (Kč)
$DCF$	diskontovaný cash flow (Kč)
$d$	nominální diskontní sazba (-)
$NPV$	čistá současná hodnota (Kč)
$T_p$	doba porovnání (rok)
$T_s$	doba návratnosti (rok)
$C_{rp}$	cena za rezervovaný příkon (Kč · MW <sup>-1</sup> )
$V_j$	jednorázový výnos (Kč)
$P_{max}$	rezervovaná kapacita (MW)
$A$	činná elektrická energie (MWh)
$p_{max\%}$	procentní využití rezervovaného příkonu (%)
$\tau$	doba využití maxima (h)
$\tau_{\%}$	procentní využití doby trvání určitého období (%)
$T$	doba trvání časového období (h)
$C_{rk}$	cena za rezervovanou kapacitu (Kč · MW <sup>-1</sup> · měsíc <sup>-1</sup> )
$C_{ps}$	cena za použití sítě (Kč · MWh <sup>-1</sup> )
$V_p$	pravidelné výnosy (Kč)
$n_d$	měrné náklady na demontáž vedení (Kč · km <sup>-1</sup> )
$n_m$	měrné náklady na montáž vedení (Kč · km <sup>-1</sup> )
$n_{mZL}$	měrné náklady na montáž vedení se zemnícím lanem (Kč · km <sup>-1</sup> )
$l_{ZL}$	délka vedení se zemnícím lanem (km)
$n_p$	měrné provozní náklady (Kč · km <sup>-1</sup> )
$p$	převod transformátoru (-)

$u_{k\%}$ .....	procentní napětí nakrátko (%)
$Z_T$ .....	impedance transformátoru ( $\Omega$ )
$R_T$ .....	činný odpor transformátoru ( $\Omega$ )
$X_T$ .....	reaktance transformátoru ( $\Omega$ )
$Z_S$ .....	impedance nadřazené sítě ( $\Omega$ )
$R_S$ .....	činný odpor nadřazené sítě ( $\Omega$ )
$X_S$ .....	reaktance nadřazené sítě ( $\Omega$ )
$R_V$ .....	činný odpor vedení ( $\Omega$ )
$X_V$ .....	reaktance vedení ( $\Omega$ )
$I_k''$ .....	počáteční rázový zkratový proud (kA)
$S_k''$ .....	třífázový zkratový výkon (MVA)
$c$ .....	koeficient pro výpočet zkratu (-)
$R_k$ .....	zkratový činný odpor ( $\Omega$ )
$X_k$ .....	zkratová reaktance ( $\Omega$ )
$Z_k$ .....	zkratová impedance ( $\Omega$ )

### Seznam zkratk

VVN .....	velmi vysoké napětí
VN .....	vysoké napětí
NN .....	nízké napětí
ERÚ .....	Energetický regulační úřad
PDS .....	provozovatel distribuční soustavy
DS .....	distribuční soustava
PPDS .....	Pravidla provozování distribučních soustav
TR .....	transformovna
PZ .....	průmyslová zóna
SF <sub>6</sub> .....	hexafluorid sírový
AlFe .....	hliníkový lanový vodič s ocelovou duší
SAX .....	závěsný izolovaný vodič
Z1, Z2, Z3 .....	zákazník
ZVN .....	zvláště vysoké napětí

# 1 Připojení průmyslového závodu k elektrizační soustavě

## 1.1 Elektřina a průmysl

Na přelomu 19. a 20. století došlo k zásadnímu rozvoji elektroenergetiky. Ten je nepochybně svázán s průmyslem tím, že se obě odvětví vzájemně podporovala. Využívání elektrické energie v průmyslu umožnilo změnu výrobní technologie, která vedla ke zefektivnění výroby. Užitečnost elektřiny navíc vyvolala snahu o elektrifikaci domácností. Mnoho průmyslových závodů nejprve vybudovalo lokální distribuční soustavy, v nichž ovšem naprostou většinu vyrobené elektřiny spotřeboval závod samotný, a k domácnostem se dostaly jen přebytky. Pozdější propojení těchto soustav dalo, společně se systematickou výstavbou dalších zařízení, vzniknout celostátní elektrizační soustavě. Následná decentralizace výroby umožnila rozprostření lehkého průmyslu i mimo oblasti primárních energetických zdrojů. S novými poznatky nejen v elektrotechnickém oboru a uplatňováním těchto poznatků v praxi, se průmyslové závody staly s plynoucím časem více závislými na dodávce elektřiny jak z hlediska kvality, tak i z hlediska dodávaného množství.<sup>[1]</sup>

V posledních třech desetiletích bylo možné pozorovat restrukturalizaci průmyslu, konkrétně úpadek těžkého strojírenství s vysokými nároky na dodávané množství energie a naopak vzestup montoven vybudovaných obvykle zahraničními investory. Současným trendem je podpora výstavby nových průmyslových závodů ze strany měst a obcí, samozřejmě za určitých podmínek. Z požadavku příslušných orgánů a developerů realizujících výstavbu dochází ke sdružování těchto závodů do průmyslových zón situovaných v okrajových částech sídelních útvarů, vždy s ohledem na dopravní dostupnost. Tyto zóny mohou být tvořeny až desítkami samostatných průmyslových objektů a vyvstává tak otázka týkající se spolehlivého zabezpečení dodávky elektrické energie. Provozovatelé distribučních soustav jsou dle Energetického zákona<sup>[2]</sup> povinni žadatelům o připojení zařízení do elektrizační soustavy vyhovět, což od distributora vyžaduje určité zásahy do technického provedení již vybudovaných sítí, přičemž míra těchto zásahů se odvíjí od polohy stávajících sítí vzhledem k místu připojení a požadovaného rezervovaného příkonu ve vztahu k aktuální volné distribuční kapacitě vedení či transformoven. V této práci se budu zabývat připojením rozvíjející se

průmyslové zóny, tj. návrhem optimálního technicko-ekonomického řešení připojení a tomu odpovídajícím úpravám distribuční sítě. Jelikož je nutné současné žadatele, jejichž závody jsou již ve výstavbě, připojit v nejbližší možné době, bude návrh rozdělen na etapy s cílem uspokojit současný požadavek na dodávku elektřiny a zároveň v dostatečném předstihu přizpůsobit volnou distribuční kapacitu sítě dodávce elektřiny všem budoucím žadatelům o připojení v dané průmyslové zóně.

## 1.2 Volba napěťové hladiny

Průmyslové závody je možné připojit k distribuční soustavě na různých hladinách napětí. Odběratel volí požadovanou hladinu zejména dle velikosti rezervované kapacity odběru, která se odvíjí od charakteru průmyslového závodu. Na hladině VVN se vyskytují těžké průmyslové závody, na hladinu VN se připojují střední a lehké závody. Hladina NN je určena pro závody s minimálním výpočtovým zatížením (méně než 100 kW). S rostoucím příkonem se volí vyšší napěťové hladiny pro snížení proudového zatížení a dosažení předepsané kvality napětí. Sítě provozované při vyšším napětí mají zpravidla vyšší zkratový výkon, tj. nižší impedanci sítě. Úbytek napětí na této impedanci je rovněž nižší, čímž dochází k potlačení nežádoucích jevů v síti, jakými jsou výskyt harmonických napětí, kolísání velikosti napětí a jiné.

Mimo technických aspektů rozhoduje při volbě napětí také ekonomické hledisko, kterým je výše uvedený trend volby napěťové hladiny podporován. Energetický regulační úřad (ERÚ) stanovuje cenu zajišťování distribuce elektřiny pro odběratele v závislosti na napěťové hladině, jíž je k distribuční síti připojen. Pro VVN a VN se cena za distribuci elektřiny dále dělí na pevnou složku, tj. cenu za rezervovanou kapacitu pro odběr z distribuční soustavy, a variabilní složku, tj. cenu za použití sítě provozovatele distribuční soustavy (PDS).

Tab. 1.I Cena za rezervovanou kapacitu provozovatele distribuční soustavy <sup>[3]</sup>

Provozovatel distribuční soustavy	Hladina napětí	Měsíční cena za roční rezervovanou kapacitu (Kč · MW <sup>-1</sup> · měsíc <sup>-1</sup> )	Měsíční cena za měsíční rezervovanou kapacitu (Kč · MW <sup>-1</sup> · měsíc <sup>-1</sup> )
ČEZ Distribuce, a.s.	VVN	74 152	82 472
	VN	174 541	194 125
E.ON Distribuce, a.s.	VVN	62 043	69 951
	VN	149 478	168 531
PREdistribuce, a.s.	VVN	74 376	82 059
	VN	190 438	210 110
LDS Sever, spol. s.r.o.	VN	258 579	280 192
SV servisní, s.r.o.	VN	169 187	201 378

Tab. 1.II Cena za použití sítí provozovatele distribuční soustavy <sup>[3]</sup>

Provozovatel distribuční soustavy	Hladina napětí	Cena za použití sítí (Kč · MWh <sup>-1</sup> )
ČEZ Distribuce, a.s.	VVN	40,05
	VN	60,77
E.ON Distribuce, a.s.	VVN	56,30
	VN	66,82
PREdistribuce, a.s.	VVN	52,97
	VN	69,86
LDS Sever, spol. s.r.o.	VN	30,94
SV servisní, s.r.o.	VN	75,28

Z výše uvedených tabulek je patrné, že pevná složka tvoří převážnou část celkové ceny za distribuci. Rezervovaná kapacita je totiž příčinou významných investic, které PDS musí vynaložit pro spolehlivé zabezpečení dodávky, a to bez ohledu na množství odebrané el. energie. Cena za použití sítí odpovídá pouze ztrátám při přepravě odebraného množství elektřiny. V případě potřeby nepoměrně vysoké rezervované kapacity vzhledem k odebranému množství el. energie se nabízí jednosložková cena za službu sítí PDS, prostřednictvím které ERÚ poskytuje úlevu odběratelům s tímto nestandardním charakterem odběru. Pro hladinu NN se cena zajišťování distribuce obdobně dělí na pevnou složku, tj. cenu za příkon podle jmenovité proudové hodnoty hlavního jističe, a variabilní složku, tj. cenu za distribuované množství elektřiny. V tomto případě se významně uplatňuje variabilní část ceny, tudíž je celková cena ovlivněna především množstvím odebrané elektřiny. Ceny pro odběratele z hladiny NN jsou nastaveny jako prospěšné především pro domácnosti a maloodběratele ve sféře služeb. Průmyslové závody a ostatní velkoodběratele, je vzhledem k cenám za distribuci elektřiny ekonomicky výhodné připojovat k vyšším napěťovým hladinám. Jedním z vysvětlení je přenesení části



výdajů PDS na odběratele. Následnou transformaci napětí pro napájení spotřebičů na hladině NN, které se nacházejí uvnitř závodu, totiž zřizuje odběratel. PDS tak není nucen vynakládat prostředky pro zřízení a údržbu transformovny. PDS navíc upřednostňuje instalaci transformátorů do určitého jmenovitého výkonu (do 630 kVA), které nejsou náročné na chránění a odvod ztrátového tepla, zatímco velkoodběratel může vyžadovat připojení rezervovaného příkonu, a tomu odpovídajícího transformačního výkonu, mnohonásobně vyšší. Ve většině případů jsou průmyslové zóny připojeny k elektrizační soustavě na hladině VN, tudíž následné kapitoly této práce se budou týkat připojením na této napěťové hladině. <sup>[3][4]</sup>

### 1.3 Žádost o připojení

V případě připojování objektů v průmyslové zóně k elektrizační soustavě rozlišujeme několik principů podání žádosti. Žadatelem o připojení může být developerská společnost, která připojuje k elektrizační soustavě buď jednotlivé haly, nebo celou vyprojektovanou průmyslovou zónu s požadavkem na rezervovaný příkon stanovený dle orientačních výpočtů. Ty se opírají o střední hodnotu příkonu na jednotku plochy. V tomto případě je budoucí nájemník rezervovanou kapacitou odběru limitován a její dodatečné navýšení může vyžadovat obtížné úpravy. Další možností je podání žádosti o připojení koncovým odběratelem, tj. společností, která je schopna přesně definovat údaje o odběrném zařízení. Průmyslové zóny skýtají příležitost provozovatelům lokálních distribučních soustav, jejichž činnost přináší odběratelům několik výhod, jakými jsou flexibilnější obsluha, sdílení rezervy v hodnotách rezervovaného příkonu, odlehčení administrativní zátěže a možné snížení celkových výdajů za elektřinu.

Žádost o připojení odběrného zařízení k distribuční soustavě musí obsahovat podrobné údaje o žadateli a rovněž údaje o připojovaném zařízení. PDS je oprávněn po přijetí žádosti dodatečně vyžadovat zpracování studie připojitelnosti v definovaném rozsahu. Na posouzení žádosti o připojení na hladině VN má PDS k dispozici lhůtu 60 dnů od dodání patřičných náležitostí od žadatele. V případě kladného posouzení je PDS povinen poskytnout návrh smlouvy. Není-li ze závažných důvodů možné žadatele připojit, PDS o této skutečnosti žadatele informuje včetně udání důvodu a sdělí, za jakých odlišných podmínek lze žadatele připojit. K fyzickému připojení zařízení žadatele dochází

řádově měsíce či roky od vyhovění žádosti po provedení potřebných technických úprav stávající DS. <sup>[5]</sup>

Úpravy DS nutné k uspokojení požadavku na připojení a rezervovaný příkon musí být dle Pravidel provozování distribučních soustav (PPDS) navrženy s ohledem na: <sup>[6]</sup>

- *technicko-ekonomické podmínky připojení*
- *dosažení stanovené úrovně kvality dodávky elektřiny*
- *nejkratší technicky možnou cestu ke zdroji*
- *minimalizaci celkových nákladů na připojení*

## 1.4 Provedení připojení

Zařízení určené pro fyzické připojení odběrného zařízení se nazývá elektrická přípojka. Zahrnuje prvky elektrizační soustavy, které odbočují z přípojnic v elektrické stanici či vedení PDS, až ke vstupu do elektrické stanice odběratele. Elektrické přípojky VN dělíme na přípojky provedené venkovním vedením, na kabelové přípojky a jejich případnou kombinaci.

### 1.4.1 Přípojky provedené venkovním vedením

Ve standardních případech se uplatňuje jeden z následujících způsobů:

- a) jedna přípojka odbočující z kmenového vedení
- b) jedna přípojka odbočující z přípojnic elektrické stanice PDS

Nadstandardně, pro splnění požadavku na vyšší stupeň zabezpečení dodávky se volí jedna z těchto variant:

- a) zasmyčkování okružního vedení do elektrické stanice odběratele
- b) dvě nebo více přípojek s ohledem na nezávislost zdrojů napájení
- c) kombinace výše uvedených

### 1.4.2 Přípojky provedené kabelovým vedením

Ve standardních případech se uplatňuje jeden z následujících způsobů:

- a) zasmyčkování kabelového vedení do elektrické stanice odběratele
- b) jedna přípojka odbočující z přípojnic elektrické stanice PDS

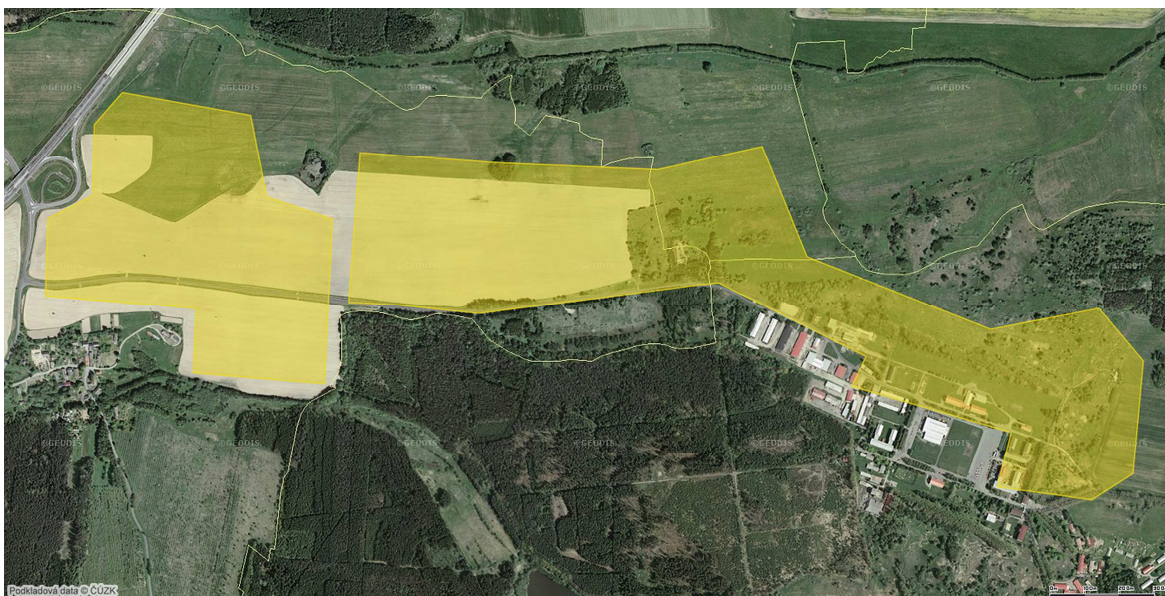
Nadstandardně, pro splnění požadavku na vyšší stupeň zabezpečení dodávky se připojení provádí dvěma či více přípojkami s ohledem na nezávislost zdrojů napájení. <sup>[6]</sup>

Žadatel se podílí na zajištění připojení úhradou tzv. oprávněných nákladů. Jejich výše je stanovena tabelárně dle způsobu připojení a udávají se v měrné hodnotě na jednotku požadovaného rezervovaného příkonu, do jehož hodnoty si poté mohou sjednávat rezervovanou kapacitu. Pro připojení zařízení na hladině VN činí měrné náklady 800 000 Kč · MW<sup>-1</sup>, respektive 200 000 Kč · MW<sup>-1</sup>, jedná-li se o připojení typu B1, při kterém se žadatel připojuje do rozvodny PDS a přípojku k místu spotřeby zřizuje čistě na vlastní náklady. Ve zvláštním případě může veškeré náklady související s připojením hradit žadatel, avšak pouze ty, které jsou nutné pro poskytování dodávky elektřiny dle požadavků žadatele, nikoli nad jejich rámec ve prospěch PDS. <sup>[5]</sup>

## 2 Stávající způsob zásobování el. energií

### 2.1 Popis vybrané průmyslové zóny

Po započetí tvorby této práce vyšla najevo skutečnost, že průmyslová zóna Kostelec u Stříbra byla z hlediska zásobování elektrickou energií již vyřešena. Z tohoto důvodu jsem se po domluvě s konzultantem rozhodl zaměřit práci na obdobný problém, a to zásobování průmyslové zóny v jiné lokalitě. Vybraná průmyslová zóna Mlýnec-Vysočany se nachází na území Plzeňského kraje, její rozloha činí 130 ha. V současné době je využíváných 16 % z celkové plochy určené k zastavění. Předpokládanými funkcemi průmyslové zóny jsou lehká průmyslová výroba, logistika, komerce a navazující bydlení. Prostorové uspořádání je patrné z mapy.



Obr. 2.1 Letecký snímek průmyslové zóny Mlýnec-Vysočany [7]

V tuto chvíli tvoří rezervovaný příkon v zóně dva významní odběratelé o souhrnné hodnotě 2 700 kW. Skutečné zatížení, tedy rezervovaná kapacita, se pak pohybuje kolem 1 700 kW. V oblasti se nachází i zdroj elektrické energie - fotovoltaická elektrárna o instalovaném výkonu 1 200 kW. Kvůli plánovanému rozšiřování výroby v průmyslové zóně obdržel provozovatel distribuční soustavy požadavek na nárůst rezervovaného příkonu o 5 000 kW s dobou realizace v horizontu 2 let. Jedná se o citelnou hodnotu navýšení, a proto bude provozovatel distribuční soustavy pravděpodobně nucen vykonat technické úpravy stávajícího zařízení, které povedou k posílení distribuční kapacity v této

lokalitě. Vzhledem ke skutečnosti, že průmyslová zóna se teprve začíná rozvíjet, je při projektování nových technických řešení potřeba vzít v úvahu celkový rezervovaný příkon, který bude možné očekávat při plném využití průmyslové zóny. Ten lze stanovit na základě rezervovaného příkonu u již plně využívaných zón s obdobnou skladbou funkcí. Využiji-li hodnoty nedaleké zóny Bor o rozloze 108 ha a rezervovaném příkonu 20 MW, mohu vypočítat tzv. měrný příkon na jednotku plochy.

$$p_s = \frac{P_{rez2}}{S_{pz2}} = \frac{20}{108} = 185,19 \cdot 10^{-3} \text{ MW} \cdot \text{ha}^{-1} \quad (2.1)$$

Následným vynásobením měrného příkonu plochou zkoumané zóny získám očekávaný příkon rezervovaný v okamžiku plného využití zóny.

$$P_{rez1} = p_s \cdot S_{pz1} = 185,19 \cdot 10^{-3} \cdot 130 = 24,07 \text{ MW} \quad (2.2)$$

Provozovatel distribuční soustavy v současnosti kalkuluje s předpokládaným tempem zvyšování rezervovaného příkonu nárůstem o 8 000 kW do roku 2025 a následně dalšími 5 000 kW v roce 2028. Plné využití průmyslové zóny s rezervovaným příkonem 24 100 kW se očekává nejdříve v roce 2032.

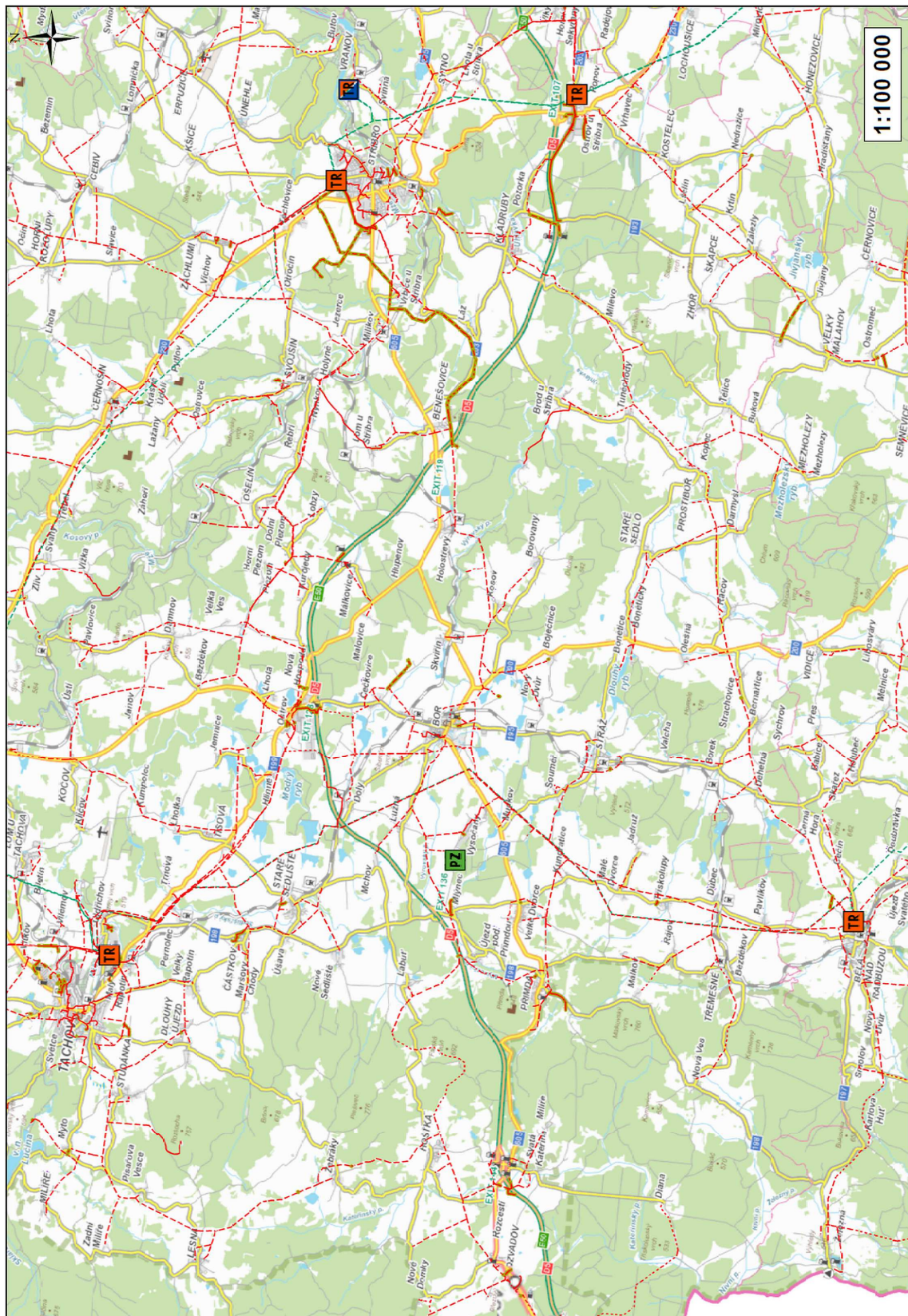
Tab. 2.1 Očekávaný rozvoj průmyslové zóny vyjádřený v etapách navyšování rezervovaného příkonu

Etapa	Rok	$\Delta P_{rez}$ (MW)	$P_{rez}$ (MW)
0.	2019	-	2,7
1.	2021	5,0	7,7
2.	2025	8,0	15,7
3.	2028	5,0	20,7
4.	2032	3,7	24,1

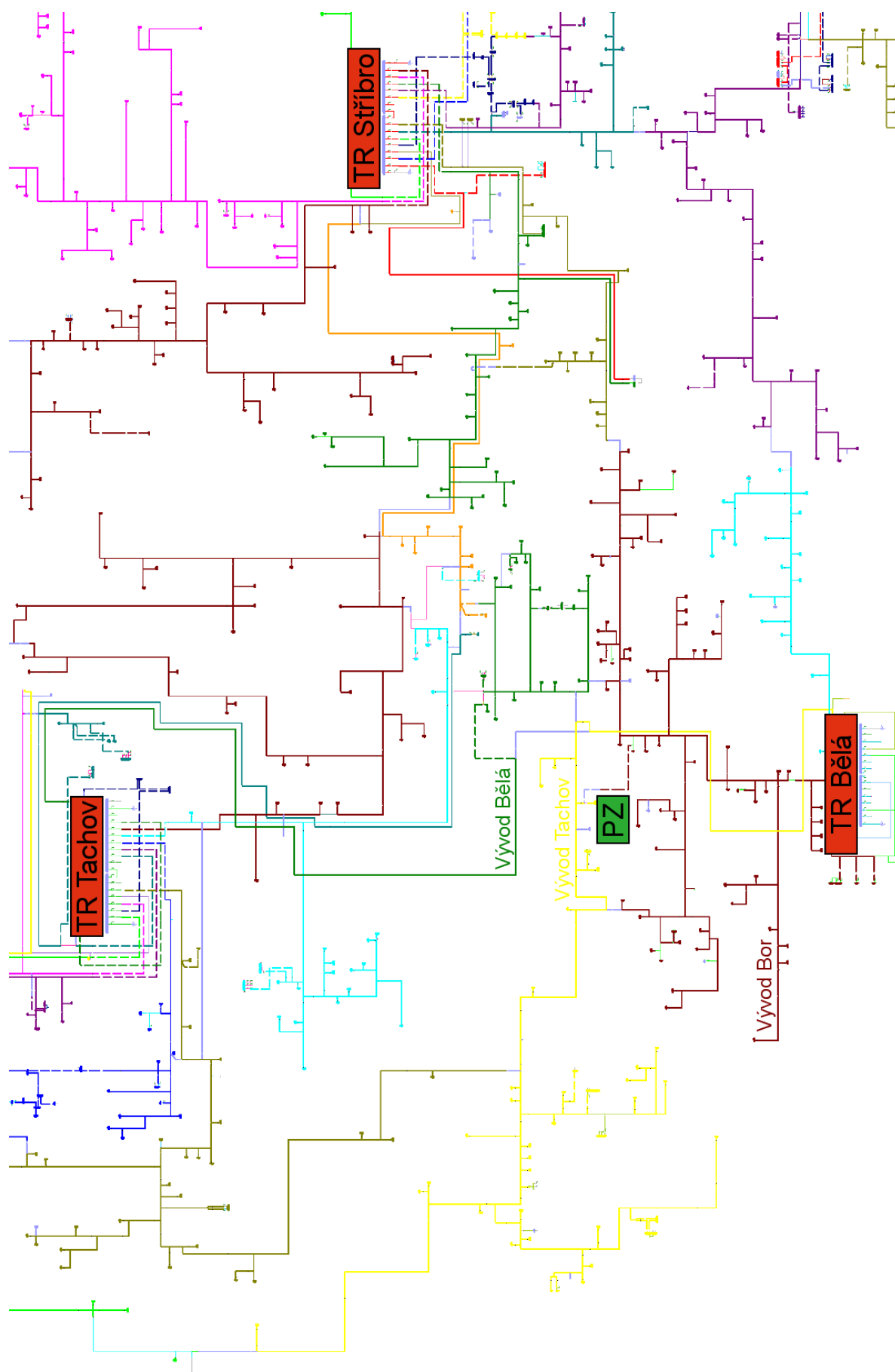
## 2.2 Možné způsoby zásobování el. energií

V současnosti přichází v úvahu zásobování ze tří transformoven 110/22 kV, které se nacházejí v blízkosti průmyslové zóny. Provedení sítě zásobující řešenou průmyslovou zónu umožňuje propojení vývodů z jednotlivých transformoven prostřednictvím spínacích prvků na vedení a následný okružní provoz. Jak je však u sítí VN obvyklé, pro dosažení vyšší přehlednosti a příznivějších podmínek pro provoz se zemním spojením, je tato síť

standardně provozována jako paprsková. Z tohoto důvodu je možné rozlišovat tři samostatné způsoby napájení průmyslové zóny, které podrobněji popíšu.



Obr. 2.2 Mapa s vyznačenými polohami transformoven a průmyslové zóny [8]



Obr. 2.3 Jednopolové schéma zobrazující napájecí oblasti tří transformoven [8]

### 2.2.1 Kritérium pro stanovení výchozího způsobu zásobování

Provozovatel distribuční soustavy vyvíjí snahu o provoz sítě v optimální konfiguraci, kdy je dodržena kvalita napětí v uzlech sítě a ztráty elektrické energie při distribuci jsou minimální. S narůstajícími odběry, a v posledních letech rovněž i nestabilními distribuovanými zdroji, se stává problematikou udržení odchylky napájecího napětí v síti v mezích stanovených normou ČSN EN 50160. Dle této normy činí dovolená odchylka napájecího napětí za normálních podmínek  $\pm 10\%$  od jmenovité hodnoty 22 kV. Provozovatel distribuční soustavy ovšem na základě svých zkušeností tento parametr ještě zpřísňuje tak, že velikost napětí nesmí klesnout pod 21,4 kV. Důvodem je snaha o dodržení normalizované odchylky na navazující hladině NN i v případech záložního napájení. Aby pak tomuto kritériu vyhověl, klade důraz pouze na kvalitu napětí, a v některých případech tedy nehledí na velikost ztrát. <sup>[9]</sup>

U vývodů z distribučních transformoven 110/22 kV rozlišujeme několik typů napěťových profilů v závislosti na skladbě připojených zařízení. Tradičně je elektrizační soustava České republiky založena na centralizované výrobě elektrické energie a předpokládá jednosměrný tok výkonu mezi jednotlivými sítěmi. Tomu odpovídají vývody, u nichž výrazně převažuje charakter odběru elektřiny. Napěťový profil těchto vývodů lze popsat následovně. Nejvyšší hodnota napětí, obvykle 23 kV, je udržována na přípojnicích v transformovně a s rostoucí vzdáleností od elektrické stanice na vývodu klesá. Míra poklesu napětí je vyjádřena vztahem (pro  $\cos \varphi > 0,5$ ): <sup>[10]</sup>

$$\Delta U = \sqrt{3} \cdot l \cdot (R_p \cdot I \cdot \cos \varphi + X_p \cdot I \cdot \sin \varphi) \quad (\text{V}) \quad (2.3)$$

Je patrné, že mimo proudového zatížení závisí také na délce vedení  $l$  a elektrických parametrech vedení. Provozní činný odpor  $R_p$  je udáván tabelárně a je dán velikostí průřezu a typem vodiče. Provozní induktivní reaktance  $X_p$  je rovněž tabelována pro jednotlivé hodnoty průřezu vodiče, nyní však také s ohledem na prostorové uspořádání vodičů. Ačkoli je hodnota reaktance typicky vyšší než velikost činného odporu, není možné ji výrazněji ovlivnit, tzn. ani snížit. Proto je potřeba zaměřit se na činný odpor. Účinník  $\cos \varphi$  proudu protékajícího vedením se pohybuje zpravidla v rozmezí hodnot 0,95 až 1, tj. převažuje činná složka proudu. Pro úbytek napětí má tedy větší význam činný odpor. Velikost průřezu vodiče se proto stává klíčovým parametrem vedení a je při návrhu volena



primárně s ohledem na zmiňovaný úbytek napětí, protože se jedná o nejpřísnější z požadavků.

### 2.2.2 Napájení z transformovny Bělá

V těsném sousedství řešené průmyslové zóny je situováno kmenové vedení vývodu Tachov, který zásobuje okrajovou část napájecí oblasti Bělá. Jedná se o rozsáhlé, avšak řídké osídlené území s odebíraným příkonem 2 500 kW. Využití tohoto způsobu zásobování se jeví jako nejvýhodnější, a proto jej provozovatel distribuční soustavy zvolil jako výchozí provozní stav. Celkem je tedy vývodem přenášeno 5 200 kW, přesto je zde patrný potenciál pro navyšování rezervovaného příkonu. Počáteční úsek vývodu je totiž tvořen jedním potahem dvojité linky VVN, která je provozována jako kombinovaná. Z toho důvodu je poměrně dlouhý úsek vedení VN zasahující téměř až k průmyslové zóně osazen vodičem o velkém průřezu 240 mm<sup>2</sup>. Navíc zde díky konstrukci vedení nepřichází v úvahu další větvení vývodu, a tedy zvyšování odběru z jiných míst.

Pro napájení průmyslové zóny se nabízí také vývod Bor, kterým je v současnosti zásobována sousední domovní zástavba. Souhrnně však tento vývod zásobuje elektřinou rozlehlou oblast, není proto žádoucí dále výrazně navyšovat odběr. K dispozici je přitom vedení o průřezu pouze 70 mm<sup>2</sup>. Jelikož tento způsob nevyhovuje ani v současnosti, nebudu jej pro další rozvoj průmyslové zóny uvažovat.

### 2.2.3 Napájení z transformovny Tachov

Do blízkosti řešené průmyslové zóny zasahuje vývod Bělá, který zásobuje elektřinou nedaleké město a část jiné průmyslové zóny. Z vývodu je pro tyto účely odebírán činný příkon 4 800 kW. Kmenové vedení je rovněž tvořeno kombinovaným vedením, které spojuje sousední transformovny Bělá a Tachov. Vedení od transformovny k průmyslové zóně je při tomto způsobu dodávky elektřiny nejkratší, nicméně kvůli již výraznějšímu odběru a snaze oddělovat napájení větších sídelních útvarů pomocí samostatných vývodů není vhodné rozšiřovat vývod Bělá o další rozsáhlou oblast, která je kvůli uspořádání sítě provázána s napájením průmyslové zóny. Přesto je zásobování z transformovny Tachov realizovatelné.

#### **2.2.4 Napájení z transformovny Stříbro**

Průmyslová zóna do napájecí oblasti transformovny Stříbro nezasahuje, protože je tato transformovna oproti předchozím dvěma již dosti vzdálená. V blízkosti se nenachází kmenové vedení žádného z tamních vývodů a zásobování průmyslové zóny by muselo probíhat prostřednictvím nepříliš nadimenzovaného vedení, které propojuje jednotlivé napájecí oblasti. Takové vedení má přitom sloužit jako záložní. Typickým příkladem využití je výpadek transformovny 110/22 kV, při němž se na záložním napájení oblasti postižené tímto výpadkem podílejí okolní transformovny. Aby při takovém nestandardním stavu bylo možné propojovacím vedením dodávat patřičnou hodnotu výkonu, není obvykle dovoleno vedení zatěžovat běžným provozem. Využití transformovny Stříbro k zásobování průmyslové zóny je v rozporu s principem, dle kterého distribuční transformovna zásobuje pouze své blízké okolí, proto tento způsob napájení přichází v úvahu pouze jako poslední stupeň zálohy pro zvýšení spolehlivosti dodávky elektřiny.

### 3 Řešení požadavků na připojení

Jak jsem již uvedl v předchozích částech této práce, průmyslová zóna se bude rozvíjet, což se projeví na hodnotě odebíraného příkonu. Aby mohl provozovatel distribuční soustavy vyhovět požadavkům na připojení nových odběrných míst, či navýšit rezervovaný příkon těch stávajících, je nucen provést zásahy do současného technického vybavení. Nyní posoudím, o jaké zásahy se bude jednat.

#### 3.1 Řešení z hlediska volné distribuční kapacity

Ačkoli jsem již zmínil význam napěťových poměrů při provozu sítě VN, prvotním předpokladem pro uspokojení požadavků na nárůst rezervovaného příkonu, odebíraného ze sítě VN, je dostatečná distribuční kapacita navazující sítě VVN a transformátorů VVN/VN, které danou oblast zásobují.

Volná transformační kapacita transformovny je dána rozdílem jmenovitého výkonu transformátoru a výpočtového zatížení, tj. příkonu, který je odebírán ve výchozím stavu sítě. Přestože je transformovna zpravidla vybavena dvěma identickými jednotkami, z důvodu dodržení kritéria n-1, je pro stanovení volné transformační kapacity limitující jmenovitý výkon jednoho stroje. Provozovatel distribuční soustavy vždy aktuální hodnoty kapacity transformačních stanic uveřejňuje na svých webových stránkách. Odtud jsem čerpal hodnoty pro transformovny, které lze uvažovat pro napájení průmyslové zóny. V případě transformovny Bělá činí volná distribuční kapacita 20 MVA, zatímco transformovna Tachov dovoluje nárůst dodávaného výkonu pouze o 5 MVA. <sup>[11]</sup>

Z tohoto údaje je patrné, že pro napájení rozrůstající se průmyslové zóny je transformovna Tachov naprosto nevyhovující. V případě potřeby je sice schopna převzít napájení průmyslové zóny a provázané oblasti (společný odběr 2,7 MW), ale již v první etapě navyšování odběru o 5 MW by požadovaná hodnota dodávaného výkonu překročila volnou distribuční kapacitu transformovny. Transformovna Bělá s ohledem na zatížení transformátoru umožňuje zásobování průmyslové zóny dle očekávaného nárůstu odběru, jak jej uvažuje provozovatel distribuční soustavy, až do roku 2028. Za předpokladu koncové hodnoty odebíraného příkonu 24,1 MW (tj. navýšení o 21,4 MW) ovšem ani tato transformovna nedisponuje dostatečnou volnou distribuční kapacitou. Problém je navíc

umocněn skutečností, že dle současného trendu bude s plynoucím časem volná kapacita ještě klesat v důsledku obdržných žádostí o navýšení rezervovaného příkonu v dalších odběrných místech napájecí oblasti.

### **3.2 Výstavba nové transformovny**

Při plném využití průmyslové zóny, kdy rezervovaný příkon dosahuje 24,1 MW, již nedostačuje transformační kapacita transformovny Bělá. Nabízí se dvě možná řešení, a to výměna stávajících transformátorů za výkonnější jednotky, nebo výstavba zcela nové transformovny.

#### **3.2.1 Důvody výstavby nové transformovny**

Provozovatel distribuční soustavy se v těchto případech přiklání k výstavbě nových transformoven. Je to patrné z nedávno realizovaných investic, které proběhly za obdobných podmínek jako zde. Důvodem je diskutabilní technická a ekonomická náročnost rekonstrukce stávající transformovny vzhledem k minimálnímu přínosu takového kroku. Výstavba nové transformovny, ideálně lokalizované v těsné blízkosti průmyslové zóny, je pochopitelně nákladnější, má ale přidanou hodnotu v pozitivním dopadu na kvalitu napětí, na velikost ztrát a zejména na spolehlivost dodávky elektrické energie. Rekonstrukce transformovny Bělá by totiž neměla žádný vliv na spolehlivost dodávky a v případě jejího úplného výpadku by zajištění dodávky ze vzdálenějších transformoven bylo při takto vysoké hodnotě rezervovaného příkonu velice problematické. Naopak při výpadku nově vybudované transformovny, která by se pochopitelně stala výchozím napájecím bodem průmyslové zóny, by zásobování převzala stávající transformovna Bělá. Díky přítomnosti dvou transformátorů a principu n-1, při kterém se zálohuje pro případ pouze jedné poruchy, by byla transformovna Bělá schopna dodávat plných 24,1 MW.

### 3.2.2 Lokalita nové transformovny

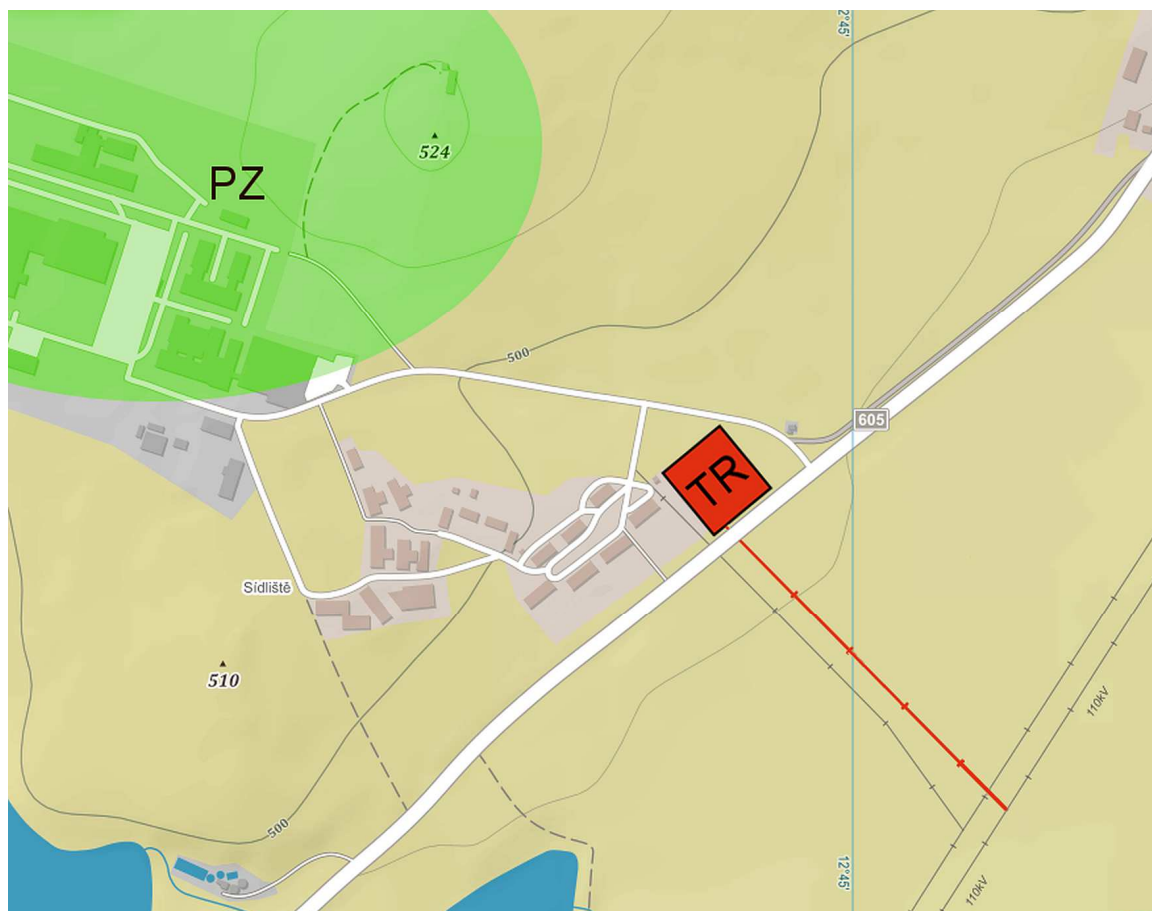
Výběr lokality vhodné pro výstavbu nové distribuční transformovny se řídí několika požadavky. Patří mezi ně:

- *blížkost vedení VVN*
- *blížkost centra spotřeby*
- *přítomnost několika stávajících vývodů VN*
- *dopravní dostupnost*
- *přítomnost inženýrských sítí*
- *ochota vlastníka k prodeji pozemku*

Jediným vhodným vedením VVN je vedení V1246, což je jeden z potahů již dříve zmíněného kombinovaného vedení, které propojuje transformovny Bělá a Tachov. Velice příznivá je skutečnost, že toto vedení prochází pouhý 1 km od hranice průmyslové zóny. Logicky se nabízí umístění nové transformovny do lokality mezi tímto vedením a průmyslovou zónou. Z požadavku na dopravní dostupnost, jejímž cílem je maximálně usnadnit samotnou výstavbu, je nutné zvolit pozemek v blízkosti pozemní komunikace. Vybranou oblast protíná komunikace II. třídy a díky nízké zastavěnosti dané oblasti, je možné vybrat takový pozemek, který s touto komunikací přímo hraničí. Volbou pozemku v sousedství stávající zástavby lze zajistit dostupnost vodovodní a stokové sítě.

Na základě těchto požadavků jsem za lokalitu vhodnou k výstavbě nové transformovny označil pozemek č. 1300 v katastrálním území Vysočany u Boru. Tento pozemek je ve vlastnictví města Bor. Ačkoli jsou sídla zpravidla nakloněna rozvoji energetické infrastruktury, je vhodné ověřit si, zda vybudování takového objektu není v rozporu s aktuálním územním plánem. Při nahlédnutí do zmíněného dokumentu jsem zjistil, že daný pozemek je již od roku 2010 uvažován jako místo pro případnou výstavbu nové transformovny. Vyznačena je zde rovněž trasa odbočky venkovního vedení VVN, která do této transformovny vyústí. Je vedena podél stávajícího vedení VN, tudíž je možné obě linky z úředního hlediska sloučit do jednoho koridoru. <sup>[12]</sup>

Umístění nové transformovny je patrné z následujícího obrázku. Zelenou barvou je vyznačena průmyslová zóna, červeně pak nová transformovna a trasa odbočky ze stávajícího vedení V1246.



Obr. 3.1 Situační schéma zobrazující umístění nové transformovny

### 3.2.3 Charakteristika nové transformovny

Základní charakteristika transformovny se odvíjí od jejího významu a požadavku na spolehlivost dodávky elektrické energie. Protože se jedná o zásobování venkovské oblasti, navíc s poměrně hustě umístěnými transformovnami, počítá se v případě poruchy výpadku celé transformovny s náhradním napájením postižené oblasti využívajícím právě tyto okolní stanice. Z tohoto důvodu nejsou na novou transformovnu kladeny vysoké nároky. Provozovatel distribuční soustavy upřednostňuje výstavbu většího množství malých a jednoduchých stanic před vybudováním jedné velké a složité distribuční transformovny, což by mělo být při návrhu nové transformovny zohledněno. Dle metodiky provozovatele distribuční soustavy, která se týká koncepce elektrických stanic VVN a VN, spadá nová transformovna do kategorie TR 3. [8]

Část VVN je u této kategorie transformoven charakterizována následovně:

- *rozvodna s jedním systémem přípojnic s jedním vypínačem na odbočku*
- *zapojení odboček typu H, nejvýše 4 pole VVN bez započtení pole podélného dělení*
- *podélné dělení přípojnice odpojovači*
- *přípojnice trubkové*
- *odbočky lanové*

Rozvodna VVN bude venkovního provedení, jelikož v oblasti výstavby nehrozí technicky neúnosné vnější znečištění izolace a velikost pozemku není omezujícím faktorem pro žádnou z možných technologií. Zda se bude jednat o klasické provedení se vzduchovou izolací o atmosférickém tlaku či kompaktní provedení s izolací SF<sub>6</sub>, bude rozhodnuto čistě na základě technicko-ekonomického hodnocení.

Vzhledem k požadavku na jednoduchost transformovny a kvůli absenci zvýšených nároků na elektrickou stanici pro danou konfiguraci sítě, jsem zvolil jednosystémovou rozvodnu VN s tímto popisem:

- *vnitřní rozvodna - skříňové modulární rozváděče VN s izolací SF<sub>6</sub>*
- *rozvodna s jedním systémem přípojnic s jedním vypínačem na odbočku*
- *podélně dělená přípojnice na sekce - podélný spínač přípojnic bude vybaven vypínačem a odpojovači s uzemňovači jednotlivých sekcí přípojnice*
- *do každé sekce bude zaústěn přívod od transformátoru VVN/VN, tyto přívody budou prioritně dispozičně osazeny jako druhá skříň od pole podélného spínače přípojnic z každé strany*

Rozvodna VN bude mít 11 polí rovnoměrně rozložených mezi obě sekce přípojnicového systému. Pole budou sloužit k těmto účelům:

- *2 přívodní odbočky od transformátoru VVN/VN*
- *2 vývodové odbočky pro zásobování průmyslové zóny*
- *4 vývodové odbočky pro zásobování okolních odběratelů*
- *2 vývodové odbočky rezervní*
- *1 vývodová odbočka pro zásobování vlastní spotřeby*

Výkonový transformátor bude třífázový olejový regulační se třemi vinutími  $110 \pm 8 \times 2 \% / 23 / 6,3$  kV. Zapojení těchto vinutí bude YNyn0/(d), tj. terciární vinutí bude kompenzační. Jmenovitý výkon stroje je u této kategorie transformovny standardně 40 MVA a je roven transformační kapacitě, kterou pak v dané oblasti disponuje distribuční soustava. Předpokládá se odebíraný činný příkon v plně využívané průmyslové zóně 24,1 MW a další odběry v řádu jednotek MW v blízkém okolí, které bude začleněno do napájecí oblasti nové transformovny. Optimální vytížení transformátoru, z hlediska minimalizace celkových ztrát a prodloužení životnosti v důsledku omezení tepelné degradace izolace, přitom činí 55 až 75 %. U moderních strojů s nízkoztrátovými plechy je optimální využití ještě nižší. Při mém odhadu odebíraného příkonu v blízkém okolí 5 MW, bude transformovna ve výchozím stavu dodávat 29,1 MW. Na základě tohoto údaje lze vypočítat procentní zatížení  $z_{\%}$  transformátoru.

$$S_p = \frac{P_p}{\cos \varphi} = \frac{29,1 \cdot 10^6}{0,98} = 29,69 \text{ MVA} \quad (3.1)$$

$$z_{\%} = \frac{S_p}{S_T} \cdot 100 = \frac{29,69 \cdot 10^6}{40 \cdot 10^6} \cdot 100 = 74,23 \% \quad (3.2)$$

Z tohoto výpočtu je vidět, že zatížení transformátoru je na hranici optimálních hodnot. Proto je důležité zmínit, že pro zvýšení spolehlivosti dodávky elektřiny bude transformovna osazena dvěma identickými jednotkami. Tato skutečnost umožňuje variabilitu provozu transformátorů, která vede ke snížení ztrát. Obvykle je v provozu pouze jeden stroj a druhý slouží jako studená záloha. V případě nárůstu využívané transformační kapacity, by však bylo z technicko-ekonomických důvodů výhodné provozovat obě jednotky zároveň. Ačkoli jsou transformátory schopné paralelního chodu, pro snížení zkratových proudů se doporučuje oddělený chod s rozepnutým podélným spínačem přípojníc. Hodnota zdánlivého výkonu, při jehož překročení se stává hospodárnějším současný provoz obou transformátorů, je závislá na parametrech konkrétních strojů. Pro výpočet této hodnoty použiji parametry transformátorů, které jsou v současnosti provozovány v transformovně Bělá. Dá se totiž očekávat, že transformátory v nové transformovně budou mít parametry obdobné. [8]



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

$$\Delta P_0 = 29,3 \text{ kW}$$

$$\Delta P_k = 170 \text{ kW}$$

Samotný výpočet hospodárneho výkonu provedu dle výrazu: <sup>[13]</sup>

$$S_{\text{hosp}} = S_T \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{\Delta P_0}{\Delta P_k}} = 40 \cdot 10^6 \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{29,3 \cdot 10^3}{170 \cdot 10^3}} = 23,48 \text{ MVA} \quad (3.3)$$

Nová transformovna bude napájet venkovskou oblast, kde výrazně převažuje venkovní vedení nad kabelovým. Síť VN je zde provozována jako kompenzovaná, proto bude uzel každého z transformátorů nepřímo uzemněn přes zhášecí tlumivku o jmenovitém výkonu 4 MVar. Pro snazší detekci vývodu postiženého zemním spojením za využití činné složky poruchového proudu bude do sekundárního vinutí tlumivky vřazen přídatný odporník.

## 4 Volba přechodného řešení požadavků na připojení

Výstavba nové transformovny je finálním řešením, co se týče výchozího napájecího stavu. Dle optimistického odhadu může být dokončena v roce 2022, podle pesimistického odhadu pak až v roce 2026. Otázkou zůstává, zda do této doby stávající zařízení distribuční soustavy uspokojí požadavky na zvyšování rezervovaného příkonu, který se z rozvojem průmyslové zóny očekává. Mimo to se vyžaduje dodržení kritéria n-1, tudíž provozovatel distribuční soustavy musí zajistit zásobování průmyslové zóny i v případě úplného výpadku nové transformovny. Proto nyní budu z několika variant volit přechodné řešení požadavků na připojení i pro dokončenou průmyslovou zónu.

### 4.1 Řešení z hlediska napěťových poměrů

Pro vyhodnocení jednotlivých variant řešení z hlediska napěťových poměrů je rozhodující nejnižší velikost napětí v síti, kterou nepochybně naměříme na konci daného vývodu. Připomenu, že limit stanovený normou činí  $U_n \pm 10\%$ . Nejnižší dovolená velikost napětí v síti o jmenovité hodnotě 22 kV je tedy 19,8 kV.

Určení nejnižší velikosti napětí pro každou z variant bude probíhat následovně:

1. Výpočet činných a jalových proudů tekoucích jednotlivými úseky vedení.
2. Výpočet úbytku napětí v jednotlivých úsecích vedení dle vztahu 2.3.
3. Výpočet celkového úbytku napětí na konci vývodu či vývodů (zasahuje-li varianta do více vývodů).
4. Výpočet velikosti napětí na konci vývodu či vývodů.

Pro stanovení velikosti jalových složek proudu je nutné zvolit hodnotu účinníku. Z měření provozovatele distribuční soustavy vyplývá, že střední účinník proudu odebíraného spotřebiči je 0,98. Velikost napětí v síti významně závisí na velikosti napětí v nadřazené transformovně. Regulátor, který se zde nachází, udržuje napětí na požadované hodnotě. Může jí být konstantní hladina napětí na přípojnicích transformovny, nebo proměnlivá velikost napětí v závislosti na zatížení sítě (tzv. regulace s kompaundací). V transformovně Bělá se uplatňuje první metoda, tj. regulace na stálé napětí v rozvodně. Jedná se o hodnotu 23 kV a budu ji uvažovat při výpočtu.

Protože je při provozu sítě žádoucí udržovat velikost napětí s určitým odstupem od normalizovaných limitů, je možné označit následující výpočet za orientační. Jedním z důvodů využití tohoto přístupu je skutečnost, že tato metoda výpočtu neuvažuje závislost odebíraných proudů na skutečných velikostech napětí v uzlech. Proudů budu počítat pouze pro jmenovitou hodnotu napětí v síti, abych vyloučil potřebu iterační metody. Schémata použitá pro výpočet jsou rovněž zjednodušená, tzn. vždy je několik distribučních transformačních stanic blízkých polohou sdruženo do skupiny, která je charakterizována zaokrouhlenou hodnotou odebíraného činného příkonu. Kmenová vedení, jež tyto skupiny odběrů propojují, jsou definována pouze jedním typem vodiče, který má v daném úseku největší podíl na celkové impedanci. Délku vedení zaokrouhluji na celé kilometry.

Vzhledem k tomu, že se v jednotlivých variantách vyskytuje pouze omezený počet typů vodiče, uvedu jejich parametry v přehledné tabulce.

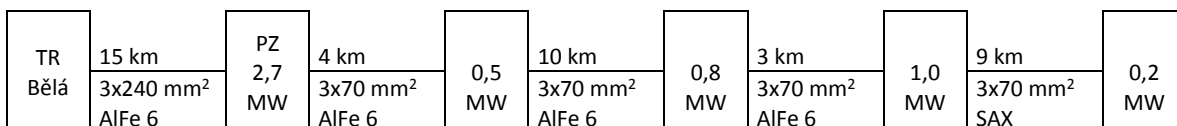
Tab. 4.1 Parametry vodičů <sup>[8]</sup>

Typ vodiče	$S$ (mm <sup>2</sup> )	$R_p$ ( $\Omega \cdot \text{km}^{-1}$ )	$X_p$ ( $\Omega \cdot \text{km}^{-1}$ )	$I_{\text{dov}}$ (A)
AlFe	3 x 110/22	0,266	0,421	318
AlFe 6	3 x 70	0,432	0,431	225
AlFe 6	3 x 240	0,125	0,400	535
SAX	3 x 70	0,443	0,138	210

#### 4.1.1 Varianta 1

První variantou řešení požadavku na navyšování rezervovaného příkonu v průmyslové zóně je zachování stávajícího způsobu zásobování z transformovny Bělá, konkrétně vývodem Tachov. Z výpočtu této varianty vyvodím, do které fáze rozvoje průmyslové zóny lze síť provozovat bez provedení jakéhokoli zásahu. Nejprve provedu výpočet při současné hodnotě rezervovaného příkonu v průmyslové zóně, tj. při 2,7 MW.

##### 4.1.1.1 Rezervovaný příkon 2,7 MW



Obr. 4.1 Zjednodušené schéma napájení dle varianty 1

Nyní aplikuji postup, který jsem již definoval dříve. Součtem činných příkonů odebíraných ze sítě v daných uzlech získám činné výkony a proudy tekoucí každým z úseků vedení. Pro účinník 0,98 vypočtu také jalové výkony a jalové proudy.

$$P_1 = 2\,700 + 500 + 800 + 1\,000 + 200 = 5\,200 \text{ kW} \quad (4.1)$$

$$Q_1 = P_1 \cdot \operatorname{tg} \varphi = 5,2 \cdot 10^6 \cdot \operatorname{tg} (\arccos 0,98) = 1\,055,91 \text{ kVAr} \quad (4.2)$$

$$I_{\varepsilon 1} = \frac{P_1}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{5,2 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 22 \cdot 10^3} = 136,46 \text{ A} \quad (4.3)$$

$$I_{j1} = \frac{Q_1}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{1\,055,91 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 22 \cdot 10^3} = 27,71 \text{ A} \quad (4.4)$$

$$P_2 = 500 + 800 + 1\,000 + 200 = 2\,500 \text{ kW} \quad (4.5)$$

$$Q_2 = P_2 \cdot \operatorname{tg} \varphi = 2 \cdot 10^6 \cdot \operatorname{tg} (\arccos 0,98) = 507,65 \text{ kVAr} \quad (4.6)$$

$$I_{\varepsilon 2} = \frac{P_2}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{2,5 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 22 \cdot 10^3} = 65,61 \text{ A} \quad (4.7)$$

$$I_{j2} = \frac{Q_2}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{507,65 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 22 \cdot 10^3} = 13,32 \text{ A} \quad (4.8)$$

$$P_3 = 800 + 1\,000 + 200 = 2\,000 \text{ kW} \quad (4.9)$$

$$Q_3 = P_3 \cdot \operatorname{tg} \varphi = 2 \cdot 10^6 \cdot \operatorname{tg} (\arccos 0,98) = 406,12 \text{ kVAr} \quad (4.10)$$

$$I_{\varepsilon 3} = \frac{P_3}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{2 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 22 \cdot 10^3} = 52,49 \text{ A} \quad (4.11)$$

$$I_{j3} = \frac{Q_3}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{406,12 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 22 \cdot 10^3} = 10,66 \text{ A} \quad (4.12)$$

$$P_4 = 1\,000 + 200 = 1\,200 \text{ kW} \quad (4.13)$$

$$Q_4 = P_4 \cdot \operatorname{tg} \varphi = 1,2 \cdot 10^6 \cdot \operatorname{tg} (\arccos 0,98) = 243,67 \text{ kVAr} \quad (4.14)$$

$$I_{\varepsilon 4} = \frac{P_4}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{1,2 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 22 \cdot 10^3} = 31,49 \text{ A} \quad (4.15)$$

$$I_{j4} = \frac{Q_4}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{243,67 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 22 \cdot 10^3} = 6,39 \text{ A} \quad (4.16)$$

$$P_5 = 200 \text{ kW} \quad (4.17)$$

$$Q_5 = P_5 \cdot \operatorname{tg} \varphi = 2 \cdot 10^5 \cdot \operatorname{tg} (\arccos 0,98) = 40,61 \text{ kVAr} \quad (4.18)$$

$$I_{\varepsilon 5} = \frac{P_5}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{2 \cdot 10^5}{\sqrt{3} \cdot 22 \cdot 10^3} = 5,25 \text{ A} \quad (4.19)$$

$$I_{j5} = \frac{Q_5}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{40,61 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 22 \cdot 10^3} = 1,07 \text{ A} \quad (4.20)$$

Dále vypočtu úbytky napětí za použití parametrů pro daný typ vodiče dle tabulky 4.I.

$$\begin{aligned} \Delta U_1 &= \sqrt{3} \cdot l_1 \cdot (R_p \cdot I_{\varepsilon 1} + X_p \cdot I_{j1}) = \\ &= \sqrt{3} \cdot 15 \cdot (0,125 \cdot 136,46 + 0,400 \cdot 27,71) = 731,14 \text{ V} \end{aligned} \quad (4.21)$$

$$\begin{aligned} \Delta U_2 &= \sqrt{3} \cdot l_2 \cdot (R_p \cdot I_{\varepsilon 2} + X_p \cdot I_{j2}) = \\ &= \sqrt{3} \cdot 4 \cdot (0,432 \cdot 65,61 + 0,431 \cdot 13,32) = 236,14 \text{ V} \end{aligned} \quad (4.22)$$

$$\begin{aligned} \Delta U_3 &= \sqrt{3} \cdot l_3 \cdot (R_p \cdot I_{\varepsilon 3} + X_p \cdot I_{j3}) = \\ &= \sqrt{3} \cdot 10 \cdot (0,432 \cdot 52,49 + 0,431 \cdot 10,66) = 472,33 \text{ V} \end{aligned} \quad (4.23)$$

$$\begin{aligned} \Delta U_4 &= \sqrt{3} \cdot l_4 \cdot (R_p \cdot I_{\varepsilon 4} + X_p \cdot I_{j4}) = \\ &= \sqrt{3} \cdot 3 \cdot (0,432 \cdot 31,49 + 0,431 \cdot 6,39) = 85,00 \text{ V} \end{aligned} \quad (4.24)$$

$$\begin{aligned} \Delta U_5 &= \sqrt{3} \cdot l_5 \cdot (R_p \cdot I_{\varepsilon 5} + X_p \cdot I_{j5}) = \\ &= \sqrt{3} \cdot 9 \cdot (0,443 \cdot 5,25 + 0,138 \cdot 1,07) = 38,56 \text{ V} \end{aligned} \quad (4.25)$$

Celkový úbytek napětí na konci vývodu je součtem dílčích úbytků.

$$\begin{aligned}\Delta U &= \Delta U_1 + \Delta U_2 + \Delta U_3 + \Delta U_4 + \Delta U_5 = \\ &= 731,14 + 236,14 + 472,33 + 85,00 + 38,56 = 1\,563,17 \text{ V}\end{aligned}\quad (4.26)$$

Výslednou hodnotu napětí na konci vývodu získám odečtením celkového úbytku napětí od napěťové úrovně, která je udržována na přípojnících napájecí transformovny.

$$U_{\min} = U_{\text{nap}} - \Delta U = 23\,000 - 1\,563,17 = 21\,436,83 \text{ V}\quad (4.27)$$

Je patrné, že při současném způsobu napájení je velikost napětí nejen v mezích stanovených normou, ale vyhovuje rovněž přísnějšímu požadavku provozovatele distribuční soustavy, který jsem dříve uvedl.

S narůstajícím rezervovaným příkonem v průmyslové zóně je nutné velikost napětí na konci vývodu přepočítat. Nárůst příkonu je rozdělen na 4 etapy o hodnotách 5 MW, 8 MW, 5 MW a 3,4 MW.

#### 4.1.1.2 Rezervovaný příkon 7,7 MW

Většina výpočtů zůstává nezměněna, přepočítám tedy jen dotčený úsek vedení.

$$P_1 = 7\,700 + 500 + 800 + 1\,000 + 200 = 10\,200 \text{ kW}\quad (4.28)$$

$$Q_1 = P_1 \cdot \operatorname{tg} \varphi = 10,2 \cdot 10^6 \cdot \operatorname{tg} (\arccos 0,98) = 2\,071,20 \text{ kVAr}\quad (4.29)$$

$$I_{\varepsilon 1} = \frac{P_1}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{10,2 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 22 \cdot 10^3} = 267,68 \text{ A}\quad (4.30)$$

$$I_{j1} = \frac{Q_1}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{2\,071,20 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 22 \cdot 10^3} = 54,35 \text{ A}\quad (4.31)$$

$$\begin{aligned}\Delta U_1 &= \sqrt{3} \cdot l_1 \cdot (R_p \cdot I_{\varepsilon 1} + X_p \cdot I_{j1}) = \\ &= \sqrt{3} \cdot 15 \cdot (0,125 \cdot 267,68 + 0,400 \cdot 54,35) = 1\,431,14 \text{ V}\end{aligned}\quad (4.32)$$

$$\begin{aligned}\Delta U &= \Delta U_1 + \Delta U_2 + \Delta U_3 + \Delta U_4 + \Delta U_5 = \\ &= 1\,431,14 + 236,14 + 472,33 + 85,00 + 38,56 = 2\,266,17 \text{ V}\end{aligned}\quad (4.33)$$

V první etapě navyšování odběru v průmyslové zóně bude výsledné napětí na konci vývodu následující.

$$U_{\min} = U_{\text{nap}} - \Delta U = 23\,000 - 2\,266,17 = 20\,733,83 \text{ V} \quad (4.34)$$

#### 4.1.1.3 Další etapy navyšování rezervovaného příkonu

Protože se výpočty pro stanovení nejnižší hodnoty napětí ve vývodu svojí podstatou neliší, nebude je zde uvádět v plném rozsahu. Pro posouzení varianty postačuje znalost výsledných hodnot napětí pro jednotlivé etapy, resp. hodnoty rezervovaného příkonu v průmyslové zóně  $P_{\text{rez}}$ . Veškeré výpočty provedu v tabulkovém kalkulátoru. Příklad používané tabulky je součástí přílohy této práce.

Tab. 4.II Tabulka výsledků pro variantu 1

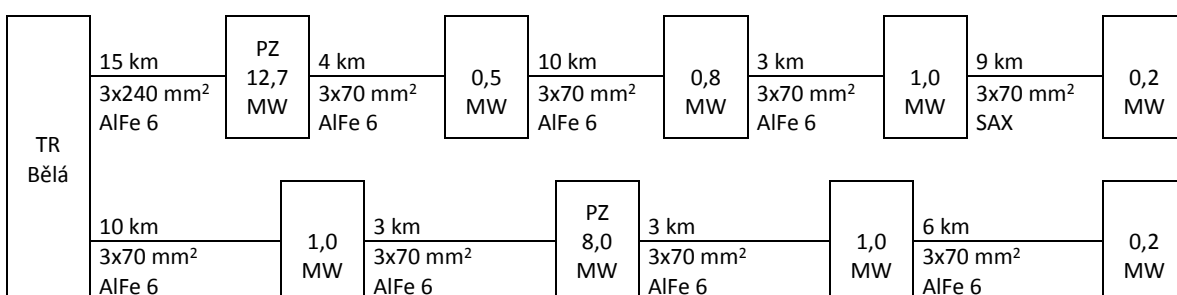
<i>i</i>	Typ vodiče	<i>l<sub>i</sub></i> (km)	$P_{\text{rez}} = 2\,700 \text{ kW}$		$P_{\text{rez}} = 7\,700 \text{ kW}$		$P_{\text{rez}} = 15\,700 \text{ kW}$	
			$P_i$ (kW)	$\Delta U_i$ (V)	$P_i$ (kW)	$\Delta U_i$ (V)	$P_i$ (kW)	$\Delta U_i$ (V)
1	AlFe 6 240 mm <sup>2</sup>	15	5 200	731,14	10 200	1 434,14	18 200	2 559,10
2	AlFe 6 70 mm <sup>2</sup>	4	2 500	236,14	2 500	236,14	2 500	236,14
3	AlFe 6 70 mm <sup>2</sup>	10	2 000	472,33	2 000	472,33	2 000	472,33
4	AlFe 6 70 mm <sup>2</sup>	3	1 200	85,00	1 200	85,00	1 200	85,00
5	SAX 70 mm <sup>2</sup>	9	200	38,56	200	38,56	200	38,56
			$\Delta U$ (V)		2 266,17		3 391,13	
			$U_{\min}$ (V)		20 733,83		19 608,87	

Na základě výsledků uvedených v tabulce lze vyhodnotit, do které etapy je možné sít provozovat bez zásahu provozovatele distribuční soustavy. Napěťové poměry při současném zatížení jsou vynikající. V první etapě navyšování rezervovaného příkonu v průmyslové zóně (o 5 000 kW) velikost napětí stále vyhovuje požadavku, tj. je vyšší než 19,8 kV. V druhé etapě (navýšení o dalších 8 000 kW) ale napětí poklesne pod dovolenou hodnotu, a proto je nutné přistoupit k jiné variantě provozu distribuční sítě. Vzhledem k tomu, že se druhá etapa navyšování odběru očekává v roce 2025, je žádoucí u zařízení distribuční soustavy provést takové úpravy, které lze realizovat do uplynutí

tohoto termínu. Tím se vylučuje výstavba vedení na nové trase, protože administrativní procesy, které je nutné vykonat před započítáním fyzických prací, mohou trvat až 10 let. [14]

#### 4.1.2 Varianta 2

Jako nejsnazší úprava distribuční sítě se jeví napájení průmyslové zóny pomocí dvou vývodů tak, aby oba byly rovnoměrně zatížené a napětí v žádném z vývodů nepokleslo pod stanovenou mez. Jedná se o vývod Tachov a vývod Bor. K tomuto způsobu zásobování průmyslové zóny elektrickou energií postačuje prostá manipulace spínacích prvků na vedení.



Obr. 4.2 Zjednodušené schéma napájení dle varianty 2

Celkový rezervovaný příkon v průmyslové zóně je součtem příkonů jednotlivých odběratelů. Aby mohl být každý odběr plně zajištěn jedním z vývodů, není možné poměr příkonů mezi vývody volit dle libosti. Budu tedy provádět výpočty pouze pro navýšení o hodnoty příkonu, které plynou z požadavku celých etap. Využiji tabulkový kalkulátor a zde uvedu pouze výsledky.

Tab. 4.III Tabulka výsledků pro variantu 2, vývod Tachov

$i$	Typ vodiče	$l_i$ (km)	$P_{rez} = 7\,700$ kW		$P_{rez} = 12\,700$ kW		$P_{rez} = 16\,100$ kW	
			$P_i$ (kW)	$\Delta U_i$ (V)	$P_i$ (kW)	$\Delta U_i$ (V)	$P_i$ (kW)	$\Delta U_i$ (V)
1	AlFe 6 240 mm <sup>2</sup>	15	10 200	1 434,14	15 200	2 137,24	18 600	2 615,30
2	AlFe 6 70 mm <sup>2</sup>	4	2 500	236,14	2 500	236,14	2 500	236,14
3	AlFe 6 70 mm <sup>2</sup>	10	2 000	472,33	2 000	472,33	2 000	472,33
4	AlFe 6 70 mm <sup>2</sup>	3	1 200	85,00	1 200	85,00	1 200	85,00
5	SAX 70 mm <sup>2</sup>	9	200	38,56	200	38,56	200	38,56
			$\Delta U$ (V)		2 266,17		2 969,27	
			$U_{min}$ (V)		20 733,83		19 552,67	



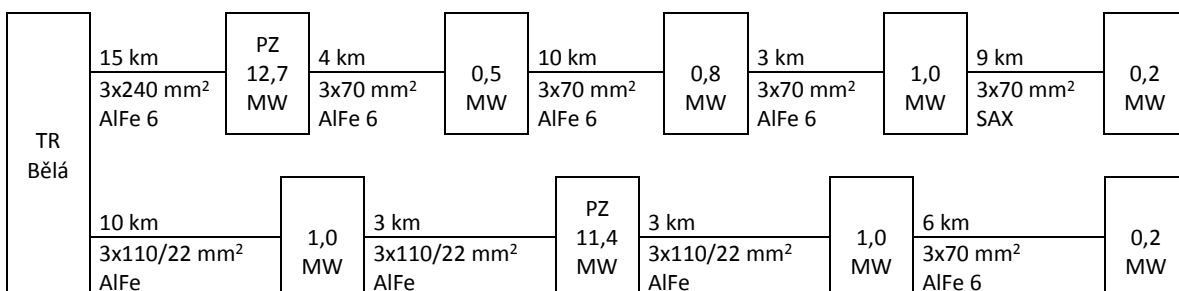
Tab. 4.IV Tabulka výsledků pro variantu 2, vývod Bor

i	Typ vodiče	$l_i$ (km)	$P_{rez} = 8\,000$ kW		$P_{rez} = 11\,400$ kW	
			$P_i$ (kW)	$\Delta U_i$ (V)	$P_i$ (kW)	$\Delta U_i$ (V)
1	AlFe 6 70 mm <sup>2</sup>	10	10 200	2 408,64	13 600	3 211,56
2	AlFe 6 70 mm <sup>2</sup>	3	9 200	651,77	12 600	892,61
3	AlFe 6 70 mm <sup>2</sup>	3	1 200	85,00	1 200	85,00
4	AlFe 6 70 mm <sup>2</sup>	6	200	28,36	200	28,36
			$\Delta U$ (V)		3 173,77	
			$U_{min}$ (V)		19 826,23	
					4 217,53	
					18 782,47	

Při rozdělení rezervovaného příkonu průmyslové zóny na 7 700 kW pro vývod Tachov a 8 000 kW pro vývod Bor, je uspokojen požadavek navýšení příkonu v druhé etapě. Velikost nejnižších napětí na konci vývodů v tomto případě vyhovuje. Při realizaci třetí etapy je možné navýšit odběr v průmyslové zóně za předpokladu, že jej bude zajišťovat vývod Tachov. Rozdělení příkonů pak bude 12 700 kW pro vývod Tachov a 8 000 kW pro vývod Bor. Pro konečnou hodnotu rezervovaného příkonu při plném využití průmyslové zóny napěťové poměry již nejsou vyhovující, a to ani pro rozdělení příkonu mezi vývody na 16 100 kW + 8 000 kW, ani pro 12 700 kW + 11 400 kW.

#### 4.1.3 Varianta 3

Předchozí varianta ukázala, že se vývod Bor může podílet na zásobování průmyslové zóny, nicméně pro přenos výraznější hodnoty výkonu je překážkou vedení nízkého průřezu 70 mm<sup>2</sup>. Rekonstrukcí tří nejvytíženějších úseků vedení, která spočívá ve výměně starých vodičů za nové s vyšším průřezem, dosáhnou snížení impedance, a tedy i úbytku napětí. Dle metodiky provozovatele distribuční soustavy se v distribučních sítích vysokého napětí standardně používá průřez venkovního vedení nejvýše 110 mm<sup>2</sup>. V souladu s tím jsem se rozhodl pro instalaci vodiče AlFe 110/22 mm<sup>2</sup>. Vývod Tachov zůstává nezměněn.



Obr. 4.3 Zjednodušené schéma napájení dle varianty 3

Jelikož je tato varianta úpravou varianty 2, použijí při výpočtech stejná rozdělení rezervovaných příkonů mezi vývody. Opět zde z výpočtu v tabulkovém kalkulátoru uveřejním pouze výsledky.

Tab. 4.V Tabulka výsledků pro variantu 3, vývod Tachov

i	Typ vodiče	$l_i$ (km)	$P_{rez} = 7\,700$ kW		$P_{rez} = 12\,700$ kW		$P_{rez} = 16\,100$ kW	
			$P_i$ (kW)	$\Delta U_i$ (V)	$P_i$ (kW)	$\Delta U_i$ (V)	$P_i$ (kW)	$\Delta U_i$ (V)
1	AlFe 6 240 mm <sup>2</sup>	15	10 200	1 434,14	15 200	2 137,24	18 600	2 615,3
2	AlFe 6 70 mm <sup>2</sup>	4	2 500	236,14	2 500	236,14	2 500	236,14
3	AlFe 6 70 mm <sup>2</sup>	10	2 000	472,33	2 000	472,33	2 000	472,33
4	AlFe 6 70 mm <sup>2</sup>	3	1 200	85,00	1 200	85,00	1 200	85,00
5	SAX 70 mm <sup>2</sup>	9	200	38,56	200	38,56	200	38,56
			$\Delta U$ (V)		2 266,17		2 969,27	
			$U_{min}$ (V)		20 733,83		19 552,67	

Tab. 4.VI Tabulka výsledků pro variantu 3, vývod Bor

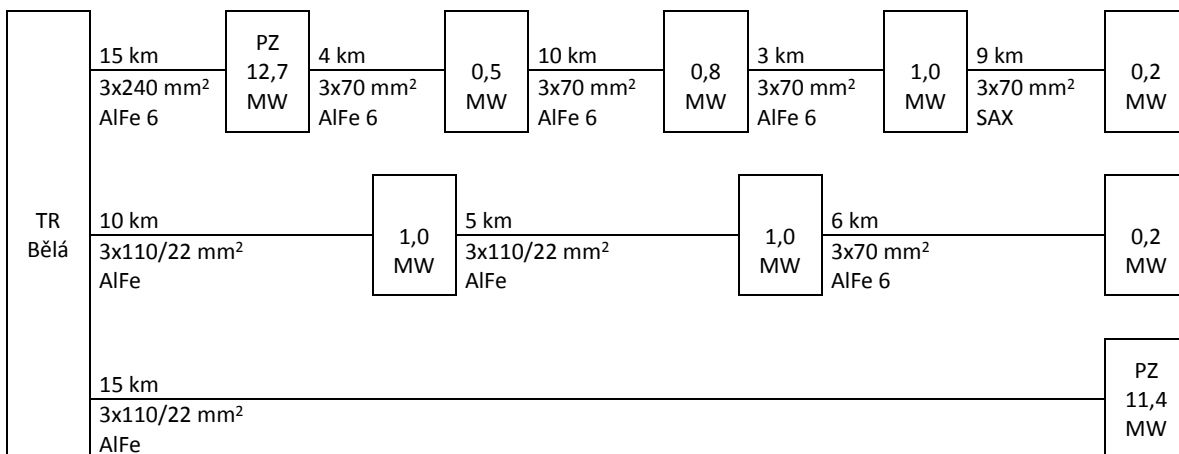
i	Typ vodiče	$l_i$ (km)	$P_{rez} = 8\,000$ kW		$P_{rez} = 11\,400$ kW	
			$P_i$ (kW)	$\Delta U_i$ (V)	$P_i$ (kW)	$\Delta U_i$ (V)
1	AlFe 110/22 mm <sup>2</sup>	10	10 200	1 629,59	13 600	2 172,82
2	AlFe 110/22 mm <sup>2</sup>	3	9 200	440,97	12 600	603,90
3	AlFe 110/22 mm <sup>2</sup>	3	1 200	57,50	1 200	57,50
4	AlFe 6 70 mm <sup>2</sup>	6	200	28,36	200	28,36
			$\Delta U$ (V)		2 156,42	
			$U_{min}$ (V)		20 843,58	

S posíleným vedením se pochopitelně vylepšily napěťové poměry na vývodu Bor. Díky tomu varianta 3 vyhovuje požadavkům na velikost napětí i v případě zásobování dokončené a plně využívané průmyslové zóny, která disponuje celkovým rezervovaným příkonem 24 100 kW. Rozdělení příkonů mezi vývody je následující: 12 700 kW zajišťuje vývod Tachov, 11 400 kW pak vývod Bor.

#### 4.1.4 Varianta 4

Má-li dojít k rekonstrukci vedení, které je součástí vývodu Bor, nabízí se vykonání ještě výraznějších prací. Ty by vedly k dalšímu vylepšení napěťových poměrů, při kterém by napětí na konci tohoto vývodu mohlo vzrůst až na očekávanou hodnotu 21,4 kV nebo by obecně podpořily potenciál navyšování rezervovaného výkonu v dalších lokalitách. Výraznějšími pracemi nad rámec varianty 3 mám na mysli kompletní výměnu sloupů,

resp. stožárů za takové, které umožní zdvojení vedení. V takovém případě totiž může jeden potah sloužit výhradně k zásobování průmyslové zóny, čímž vznikne nový vývod Vysočany. V transformovně Bělá je pro tento účel k dispozici již předem vyzbrojené rezervní pole.



Obr. 4.4 Zjednodušené schéma napájení dle varianty 4

Výhodou této varianty je, že lze provést alespoň částečné oddělení průmyslové zátěže od jiných odběrných míst, což se pozitivně projeví v oblasti kvality napětí. Konkrétně vývod Bor se nyní na zásobování průmyslové zóny vůbec nepodílí ( $P_{rez} = 0$ ), a tak ve srovnání se současným stavem zůstává nedotčen. Výsledky výpočtu jsou následující:

Tab. 4.VII Tabulka výsledků pro variantu 4, vývod Tachov

$i$	Typ vodiče	$l_i$ (km)	$P_{rez} = 7\,700$ kW		$P_{rez} = 12\,700$ kW		$P_{rez} = 16\,100$ kW	
			$P_i$ (kW)	$\Delta U_i$ (V)	$P_i$ (kW)	$\Delta U_i$ (V)	$P_i$ (kW)	$\Delta U_i$ (V)
1	AlFe 6 240 mm <sup>2</sup>	15	10 200	1 434,14	15 200	2 137,24	18 600	2 615,30
2	AlFe 6 70 mm <sup>2</sup>	4	2 500	236,14	2 500	236,14	2 500	236,14
3	AlFe 6 70 mm <sup>2</sup>	10	2 000	472,33	2 000	472,33	2 000	472,33
4	AlFe 6 70 mm <sup>2</sup>	3	1 200	85,00	1 200	85,00	1 200	85,00
5	SAX 70 mm <sup>2</sup>	9	200	38,56	200	38,56	200	38,56
			$\Delta U$ (V)	2 266,17		2 969,27		3 447,33
			$U_{min}$ (V)	20 733,83		20 030,73		19 552,67

Tab. 4.VIII Tabulka výsledků pro variantu 4, vývod Bor

			$P_{\text{rez}} = 0 \text{ kW}$	
$i$	Typ vodiče	$l_i$ (km)	$P_i$ (kW)	$\Delta U_i$ (V)
1	AlFe 110/22 mm <sup>2</sup>	10	2 200	351,48
2	AlFe 110/22 mm <sup>2</sup>	5	1 200	95,84
3	AlFe 6 70 mm <sup>2</sup>	6	200	28,36
$\Delta U$ (V)				475,68
$U_{\text{min}}$ (V)				22 524,32

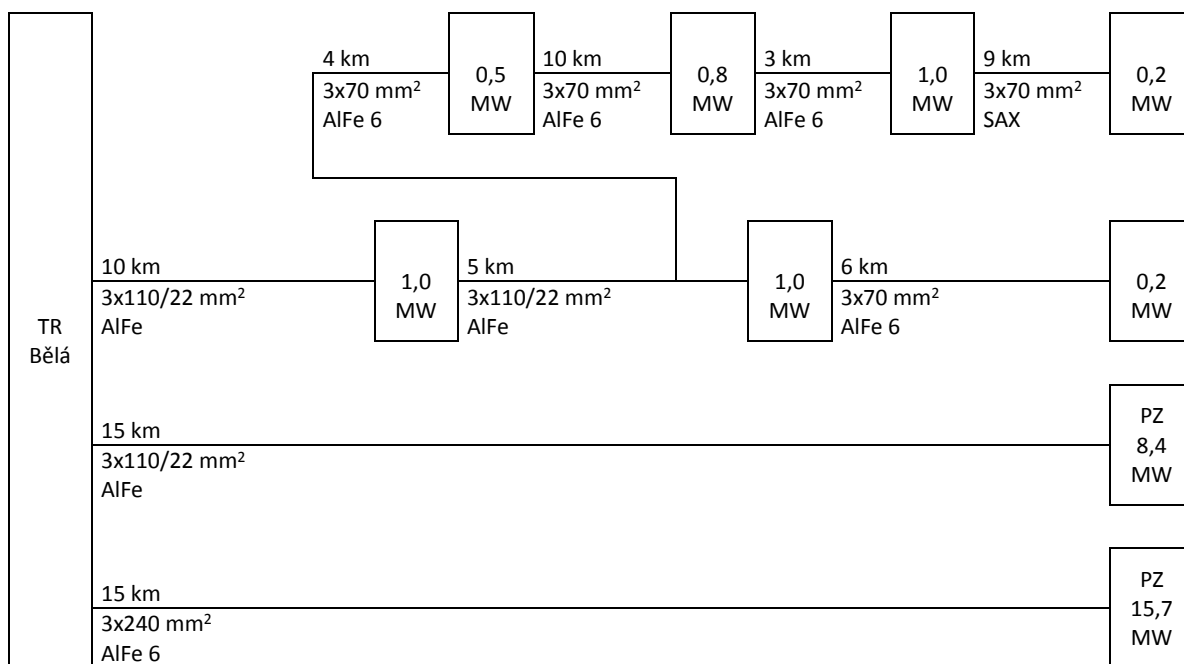
Tab. 4.IX Tabulka výsledků pro variantu 4, vývod Vysočany

			$P_{\text{rez}} = 8 000 \text{ kW}$		$P_{\text{rez}} = 11 400 \text{ kW}$		$P_{\text{rez}} = 13 000 \text{ kW}$	
$i$	Typ vodiče	$l_i$ (km)	$P_i$ (kW)	$\Delta U_i$ (V)	$P_i$ (kW)	$\Delta U_i$ (V)	$P_i$ (kW)	$\Delta U_i$ (V)
1	AlFe 110/22 mm <sup>2</sup>	15	8 000	1 917,22	11 400	2 732,01	13 000	3 115,49
$\Delta U$ (V)				1 917,22		2 732,01		3 115,49
$U_{\text{min}}$ (V)				21 082,78		20 267,99		19 884,51

Výsledky výpočtů ukázaly, že tato varianta má podstatný vliv na napětí ve vývodu Bor, kde jeho velikost výrazně vzrostla až na 22,5 kV. Zbylé vývody Tachov a Vysočany, které se podílejí na zásobování plně využívané průmyslové zóny, zůstávají z hlediska napětí prakticky nezměněny.

#### 4.1.5 Varianta 5

V souladu s přístupem, který vyplynul z předchozí varianty, navrhuji způsob zásobování, při němž dochází již k úplnému oddělení průmyslové zóny od zbytku sítě vysokého napětí. Varianta obnáší změnu konfigurace stávajících vývodů tak, aby rozsáhlá oblast, která je v současnosti zásobována elektrickou energií vývodem Tachov, byla nyní zajištěna vývodem Bor. Tímto krokem se uvolní vývod Tachov s dobře nadimenzovaným vedením o průřezu 240 mm<sup>2</sup> čistě pro napájení průmyslové zóny, které zajišťuje společně s novým vývodem Vysočany.



Obr. 4.5 Zjednodušené schéma napájení dle varianty 5

Tab. 4.X Tabulka výsledků pro variantu 5, vývod Bor, první větev

$i$	Typ vodiče	$l_i$ (km)	$P_{rez} = 0$ kW	
			$P_i$ (kW)	$\Delta U_i$ (V)
1	AlFe 110/22 mm <sup>2</sup>	10	4 700	750,92
2	AlFe 110/22 mm <sup>2</sup>	5	3 700	295,58
3	AlFe 6 70 mm <sup>2</sup>	4	2 500	236,14
4	AlFe 6 70 mm <sup>2</sup>	10	2 000	472,33
5	AlFe 6 70 mm <sup>2</sup>	3	1 200	85
6	SAX 70 mm <sup>2</sup>	9	200	38,56
			$\Delta U$ (V)	1 878,53
			$U_{min}$ (V)	21 121,47

Tab. 4.XI Tabulka výsledků pro variantu 5, vývod Bor, druhá větev

$i$	Typ vodiče	$l_i$ (km)	$P_{rez} = 0$ kW	
			$P_i$ (kW)	$\Delta U_i$ (V)
1	AlFe 110/22 mm <sup>2</sup>	10	4 700	750,92
2	AlFe 110/22 mm <sup>2</sup>	5	3 700	295,58
3	AlFe 6 70 mm <sup>2</sup>	6	200	28,36
			$\Delta U$ (V)	1 074,86
			$U_{min}$ (V)	21 925,14

Tab. 4.XII Tabulka výsledků pro variantu 5, vývod Vysočany

			$P_{\text{rez}} = 8\,400\text{ kW}$		$P_{\text{rez}} = 11\,400\text{ kW}$		$P_{\text{rez}} = 13\,000\text{ kW}$	
$i$	Typ vodiče	$l_i$ (km)	$P_i$ (kW)	$\Delta U_i$ (V)	$P_i$ (kW)	$\Delta U_i$ (V)	$P_i$ (kW)	$\Delta U_i$ (V)
1	AlFe 110/22 mm <sup>2</sup>	15	8 400	2 013,02	11 400	2 732,01	13 000	3 115,49
			$\Delta U$ (V)			2 732,01		3 115,49
			$U_{\text{min}}$ (V)			20 267,99		19 884,51

Tab. 4.XIII Tabulka výsledků pro variantu 5, vývod Tachov

			$P_{\text{rez}} = 9\,100\text{ kW}$		$P_{\text{rez}} = 12\,700\text{ kW}$		$P_{\text{rez}} = 15\,700\text{ kW}$	
$i$	Typ vodiče	$l_i$ (km)	$P_i$ (kW)	$\Delta U_i$ (V)	$P_i$ (kW)	$\Delta U_i$ (V)	$P_i$ (kW)	$\Delta U_i$ (V)
1	AlFe 6 240 mm <sup>2</sup>	15	9 100	1 279,48	12 700	1 785,74	15 700	2 207,49
			$\Delta U$ (V)			1 785,74		2 207,49
			$U_{\text{min}}$ (V)			21 214,26		20 792,51

Velikosti napětí na obou koncích vývodu Bor, který zajišťuje napájení občanské zástavby, jsou příznivé, na jedné větvi dokonce přesahuje 21,4 kV. Při společném zásobování průmyslové zóny vývody Vysočany a Tachov je k dispozici několik možných způsobů rozdělení příkonu. Nejvýhodnější napěťové poměry však nastávají při zdánlivě nerovnoměrném rozdělení 8 400 kW pro vývod Vysočany a 15 700 kW pro vývod Tachov, a to z důvodu použitého typu vodiče pro jednotlivé vývody.

## 4.2 Řešení z hlediska ekonomického

Pro volbu jedné z vyjmenovaných variant řešení požadavků na připojení je klíčové ekonomické hodnocení. To provedu pomocí výpočtového modulu, který pro tyto účely využívá provozovatel distribuční soustavy.

### 4.2.1 Základní ekonomické pojmy

#### 4.2.1.1 Cash flow (CF)

Cash flow počítaný jako rozdíl mezi příjmy a výdaji v daném roce hodnocení projektu lze popsat matematickým výrazem:

$$CF_t = V_t - N_{pt} - N_{it} - D_t + P_t \quad (\text{Kč}) \quad (4.35)$$

kde:  $V_t$  ..... výnosy v roce  $t$   
 $N_{pt}$  ..... provozní náklady v roce  $t$   
 $N_{it}$  ..... investiční náklady v roce  $t$   
 $D_t$  ..... daň z příjmu v roce  $t$   
 $P_t$  ..... podíl zákazníka v roce  $t$

#### 4.2.1.2 Diskontovaný cash flow (DCF)

Diskontovaný cash flow představuje současnou hodnotu ročních hodnot  $CF$ .  $DCF$  lze určit podle vztahu:

$$DCF_t = CF_t \cdot (1 + d)^{-t} \quad (\text{Kč}) \quad (4.36)$$

kde:  $CF_t$  ..... cash flow v roce  $t$   
 $d$  ..... nominální diskontní sazba  
 $t$  ..... počet let mezi daným rokem a počátkem hodnoceného období

#### 4.2.1.3 Čistá současná hodnota (NPV)

Čistá současná hodnota projektu (net present value) je součet čistých diskontovaných cash flow za hodnocené období.

$$NPV = \sum_{t=1}^{T_p} CF_t \cdot (1 + d)^{-t} \quad (\text{Kč}) \quad (4.37)$$

kde:  $CF_t$  ..... cash flow v roce  $t$   
 $d$  ..... nominální diskontní sazba  
 $t$  ..... počet let mezi daným rokem a počátkem hodnoceného období  
 $T_p$  ..... doba porovnání

#### 4.2.1.4 Doba návratnosti ( $T_s$ )

Doba návratnosti vyjadřuje dobu potřebnou pro úhradu vloženého kapitálu do projektu jeho čistými výnosy. Udává tedy rok, kdy převáží tvorba finančních zdrojů nad jejich čerpáním. Jedná se pouze o doplňující ukazatel ekonomické efektivnosti.

$$NPV = \sum_{t=1}^{T_s} CF_t \cdot (1 + d)^{-t} \stackrel{!}{=} 0 \quad (\text{Kč}) \quad (4.38)$$

kde:  $CF_t$  ..... cash flow v roce  $t$   
 $d$  ..... nominální diskontní sazba  
 $t$  ..... počet let mezi daným rokem a počátkem hodnoceného období  
 $T_s$  ..... doba návratnosti <sup>[8]</sup>

#### 4.2.2 Postup výpočtu ekonomické efektivity

Rozhodnutí o tom, která z variant bude na základě ekonomického hodnocení upřednostňována, bude výsledkem porovnání velikostí čisté současné hodnoty mezi jednotlivými variantami. Vzhledem k tomu, že poslední navýšení rezervovaného příkonu v průmyslové zóně se předpokládá v roce 2032, zvolil jsem dobu hodnocení investice 15 let. Uvedené číselné hodnoty  $NPV$  nelze chápat jako skutečný zisk provozovatele distribuční soustavy, ačkoli pro vzájemné porovnání variant jsou postačující. Dobu návratnosti proto použiji pouze k dokreslení představy.

Ze vztahu pro  $NPV$  (4.37) je zřejmé, že čistá současná hodnota závisí na veličině  $CF$ , proto je nejprve potřeba stanovit výši základních ekonomických ukazatelů, jakými jsou náklady a výnosy.

##### 4.2.2.1 Stanovení nákladů

Náklady se dělí na investiční a provozní. Investiční náklady vznikají v případě, že dochází k úpravám na některém ze zařízení distribuční soustavy. Jejich výši stanovím na základě jednicových kalkulací, které mi poskytl provozovatel distribuční soustavy. Jedná se o ceník, u kterého se položky vztahují na určitou měrnou jednotku, v tomto případě kilometr délky. Mimo výdajů na materiál a provedené práce zahrnuje rovněž výdaje za vypracování projektové dokumentace. Investiční náklady budou vynakládány na počátku hodnoceného období. Provozní náklady vznikají každoročně, protože reprezentují pravidelnou údržbu zařízení. Abych z ekonomického hodnocení vyloučil veškerá stávající zařízení, která se v jednotlivých variantách podílejí na zásobování průmyslové zóny, označím provozní náklady na jejich údržbu za nulové. Díky tomu budou provozní náklady nenulové pouze u variant, u nichž dojde k jejich navýšení oproti současnosti.



#### 4.2.2.2 Stanovení výnosů

Výnosy rozlišujeme podle jejich původu na tři druhy. Za prvé jsou jimi jednorázové příjmy za připojení určitého rezervovaného příkonu. Jak jsem již uvedl v kapitole 1.4, cena za tuto službu ( $C_{rp}$ ) činí 800 tis. Kč · MW<sup>-1</sup>. Výši jednorázového výnosu vypočítáme:

$$V_j = C_{rp} \cdot P_{rez} \quad (\text{Kč}) \quad (4.39)$$

Tyto příjmy vzniknou v letech, ve kterých si rozvoj průmyslové zóny vyžádá přechod do další etapy navyšování rezervovaného příkonu a zároveň bude provozovatel distribuční soustavy požadavek na navýšení schopen uspokojit. Druhým zdrojem výnosů jsou pravidelné měsíční příjmy za rezervovanou kapacitu. Dle tabulky 1.I je, v případě rezervace stejné hodnoty kapacity po dobu celého roku, cena 174 541 Kč · MW<sup>-1</sup> · měsíc<sup>-1</sup>. Třetím druhem výnosů jsou pravidelné příjmy za použití sítí, které závisí na množství dodané elektrické energie. Podle tabulky 1.II je cena za distribuci elektřiny rovna 60,77 Kč · MWh<sup>-1</sup>.

Pro dosavadní úvahy jsem využíval předpokládané hodnoty rezervovaného příkonu, v praxi jej ale odběratelé zcela nevyužívají, a proto je rezervovaná kapacita nižší. Abych mohl předpovědět výši rezervované kapacity v průmyslové zóně v jednotlivých letech, vyžádal jsem si od provozovatele distribuční soustavy data o třech náhodně vybraných skutečných zákaznících. Pomocí obdržných dat rovněž určím množství odebrané elektrické energie.

Tab. 4.XIV Hodnoty maximálního odebíraného činného příkonu a dodané činné energie u tří zákazníků <sup>[8]</sup>

Zákazník	Z1		Z2		Z3	
$P_{rez}$ (MW)	5		6		5,5	
Měsíc	$P_{max}$ (MW)	A (MWh)	$P_{max}$ (MW)	A (MWh)	$P_{max}$ (MW)	A (MWh)
1	1,57	763	3,05	1 525	4,55	2 370
2	1,48	635	3,03	1 409	4,57	2 272
3	1,39	655	3,04	1 525	4,52	2 330
4	1,56	615	2,89	1 346	4,39	1 957

Z těchto dat vypočítám využití příkonu  $p_{max\%}$  jako poměr mezi maximálním odebíraným příkonem  $P_{max}$  (rezervovanou kapacitou) a rezervovaným příkonem  $P_{rez}$ . Pro zákazníka Z1 a první měsíc platí:

$$p_{\max\%} = \frac{P_{\max}}{P_{\text{rez}}} \cdot 100 = \frac{1,57 \cdot 10^6}{5 \cdot 10^6} \cdot 100 = 31 \% \quad (4.40)$$

Nyní pro zákazníka Z1 a první měsíc vypočítám dobu využití maxima  $\tau$ .<sup>[15]</sup>

$$\tau = \frac{A}{P_{\max}} = \frac{763 \cdot 10^6}{1,57 \cdot 10^6} = 486 \text{ h} \quad (4.41)$$

Procentní využití vzhledem k době trvání jednoho měsíce ( $T = 720$  h) bude:

$$\tau_{\%} = \frac{\tau}{T} \cdot 100 = \frac{486}{720} \cdot 100 = 68 \% \quad (4.42)$$

Tento postup aplikuji na ostatní zákazníky a měsíce, výpočet realizuji v tabulkovém kalkulátoru a uvedu pouze výsledky.

Tab. 4.XV Výsledky výpočtů pro zákazníka Z1

$P_{\text{rez}} = 5 \text{ MW}$					
Měsíc	$P_{\max}$ (MW)	$A$ (MWh)	$p_{\max\%}$ (%)	$\tau$ (h)	$\tau_{\%}$ (%)
1	1,57	763	31	486	68
2	1,48	635	30	429	60
3	1,39	655	28	471	65
4	1,56	615	31	395	55
Průměr			30		62

Tab. 4.XVI Výsledky výpočtů pro zákazníka Z2

$P_{\text{rez}} = 6 \text{ MW}$					
Měsíc	$P_{\max}$ (MW)	$A$ (MWh)	$p_{\max\%}$ (%)	$\tau$ (h)	$\tau_{\%}$ (%)
1	3,05	1 525	51	500	69
2	3,03	1 409	51	465	65
3	3,04	1 525	51	502	70
4	2,89	1 346	48	466	65
Průměr			50		67

Tab. 4.XVII Výsledky výpočtů pro zákazníka Z3

$P_{\text{rez}} = 5,5 \text{ MW}$					
Měsíc	$P_{\text{max}}$ (MW)	$A$ (MWh)	$p_{\text{max}\%}$ (%)	$\tau$ (h)	$\tau_{\%}$ (%)
1	4,55	2 370	83	521	72
2	4,57	2 272	83	497	69
3	4,52	2 330	82	515	72
4	4,39	1 957	80	446	62
Průměr			82		69

Z výpočtů vyplývá, že zákazník Z1 využívá rezervovaný příkon pouze z 30 %, zákazník Z2 již z 50 % a zákazník Z3 jej pak využívá dokonce z 82 %. Tyto hodnoty využijí pro stanovení rezervované kapacity v průmyslové zóně následujícím způsobem. V posledním roce každé etapy navyšování rezervovaného příkonu bude rezervovaná kapacita rovna 82 % z aktuální velikosti rezervovaného příkonu (v následujících tabulkách budou dotčené buňky vybarveny oranžově). V předposledním roce etapy bude rezervovaná kapacita vyšší o 50 % z hodnoty navýšení rezervovaného příkonu v této etapě oproti rezervované kapacitě v posledním roce předchozí etapy (žlutě). V ostatních letech bude rezervovaná kapacita vyšší pouze o 30 % z hodnoty navýšení rezervovaného příkonu v této etapě oproti rezervované kapacitě v posledním roce předchozí etapy (zeleně).

Roční odebraná elektrická energie v každém z roků zkoumaného období bude stanovena pomocí výrazu:

$$A = 12 \cdot P_{\text{max}} \cdot T \cdot \frac{\tau_{\%}}{100} \quad (\text{Wh}) \quad (4.43)$$

Kde  $\tau_{\%}$  je dáno jako celková průměrná hodnota plynoucí z výpočtu pro každý měsíc a zákazníka.

$$\tau_{\%} = \frac{\sum_i^3 \tau_{\%i}}{3} = \frac{62 + 67 + 69}{3} = 66 \quad \% \quad (4.44)$$

Roční výnosy z pravidelných příjmů jsou definovány následovně:

$$V_p = 12 \cdot C_{rk} \cdot P_{max} + C_{ps} \cdot A \quad (\text{Kč}) \quad (4.45)$$

Kde  $C_{rk}$  je cena za rezervovanou kapacitu a  $C_{ps}$  je cena za použití sítí. Obě tyto ceny jsou pro výpočet výnosů každoročně navyšovány o inflaci ve výši 3 %. Výpočet všech výnosů provedu pomocí tabulkového kalkulátoru a zde budu uvádět pouze výsledky. Prostředí, v kterém výpočet výnosů provedu, je součástí přílohy.

#### 4.2.2.3 Výpočet čisté současné hodnoty NPV

Tento výpočet bude probíhat prostřednictvím modelu zpracovaného v tabulkovém kalkulátoru. Model využívá provozovatel distribuční soustavy pro zjednodušené ekonomické hodnocení investičních projektů. Parametry modelu jsou tyto:

- *daň z příjmu 19 %*
- *inflace 3 %*
- *odpisy po dobu 25 let, tj. odpisová sazba 4 %*
- *diskontní sazba 8 %*
- *počáteční rok investice 2020*

#### 4.2.3 Výpočet ekonomické efektivity jednotlivých variant

##### 4.2.3.1 Varianta 1

Protože se jedná o stávající provoz distribuční soustavy, nevyskytují se zde žádné investiční náklady ( $N_{i1} = 0$ ). Rovněž provozní náklady u této výchozí varianty označím za nulové ( $N_{p1} = 0$ ).

Vzhledem k tomu, že varianta 1 je technicky schopna zajistit zásobování průmyslové zóny pouze do první etapy navyšování rezervovaného příkonu, bude po celou dobu hodnocení nejvyšší rezervovaný příkon dosahovat 7,7 MW. Díky tomu budou pravidelné výnosy od roku 2025 růst pouze o inflaci. V roce 2021 vznikne jednorázový výnos za navýšení rezervovaného příkonu o 5 MW.

Tab. 4.XVIII Výsledky výpočtu výnosů pro variantu 1

Rok	$P_{\text{rez}}$ (MW)	$P_{\text{max}}$ (MW)	A (MWh)	$V_p$ (tis. Kč)	$V_j$ (tis. Kč)
2019	2,7	1,7	9 694,08	4 149,75	
2020	2,7	2,2	12 545,28	5 531,37	
2021	7,7	3,7	21 098,88	9 581,84	4 000,00
2022	7,7	3,7	21 098,88	9 869,29	
2023	7,7	5,7	32 503,68	15 660,16	
2024	7,7	6,3	35 925,12	17 827,86	
2025	7,7	6,3	35 925,12	18 362,70	
2026	7,7	6,3	35 925,12	18 913,58	
2027	7,7	6,3	35 925,12	19 480,98	
2028	7,7	6,3	35 925,12	20 065,41	
2029	7,7	6,3	35 925,12	20 667,38	
2030	7,7	6,3	35 925,12	21 287,40	
2031	7,7	6,3	35 925,12	21 926,02	
2032	7,7	6,3	35 925,12	22 583,80	
2033	7,7	6,3	35 925,12	23 261,31	
2034	7,7	6,3	35 925,12	23 959,15	
2035	7,7	6,3	35 925,12	24 677,93	

Výpočtem čisté současné hodnoty investice pomocí již zmíněného modelu jsem dospěl k částce 163 449,94 tis. Kč. Výsledky mezivýpočtů *NPV* této varianty i variant následujících naleznete v příloze.

#### 4.2.3.2 Varianta 2

Tato varianta nevyžaduje žádné úpravy zařízení distribuční soustavy, a proto jsou zde investiční náklady i provozní náklady nulové stejně jako v předešlém případě ( $N_{i2} = 0$ ,  $N_{p2} = 0$ ).

Varianta 2 umožňuje zajištění dodávky elektrické energie pouze do hodnoty rezervovaného příkonu 20,7 MW. To znamená, že od roku 2032 pravidelné výnosy porostou pouze o míru inflace.

Tab. 4.XIX Výsledky výpočtu výnosů pro variantu 2

Rok	$P_{\text{rez}}$ (MW)	$P_{\text{max}}$ (MW)	A (MWh)	$V_p$ (tis. Kč)	$V_j$ (tis. Kč)
2019	2,7	1,7	9 694,08	4 149,75	
2020	2,7	2,2	12 545,28	5 531,37	
2021	7,7	3,7	21 098,88	9 581,84	4 000,00
2022	7,7	3,7	21 098,88	9 869,29	
2023	7,7	5,7	32 503,68	15 660,16	
2024	7,7	6,3	35 925,12	17 827,86	
2025	15,7	8,7	49 610,88	25 358,01	6 400,00
2026	15,7	10,3	58 734,72	30 922,20	
2027	15,7	12,9	73 560,96	39 889,64	
2028	20,7	14,4	82 114,56	45 863,80	4 000,00
2029	20,7	14,4	82 114,56	47 239,72	
2030	20,7	15,4	87 816,96	52 035,86	
2031	20,7	17,0	96 940,80	59 165,45	
2032	20,7	17,0	96 940,80	60 940,41	
2033	20,7	17,0	96 940,80	62 768,63	
2034	20,7	17,0	96 940,80	64 651,68	
2035	20,7	17,0	96 940,80	66 591,24	

Čistá současná hodnota investice činí 323 690,69 tis. Kč.

#### 4.2.3.3 Varianta 3

U této varianty již dochází k úpravám distribuční soustavy, tudíž se zde vyskytují investiční náklady. Navýšení průřezu vodiče na venkovním vedení vyžaduje dvě investice. První je demontáž stávajícího vodiče, dle jednicové kalkulace má tento úkon hodnotu 150 tis. Kč · km<sup>-1</sup>. Následuje montáž vodiče vyššího průřezu, která se v případě vodiče AlFe 110/22 mm<sup>2</sup> cení na 1 010 tis. Kč · km<sup>-1</sup>. Délka rekonstruovaného vedení činí 16 km. Celkové investiční náklady vypočítám následovně.

$$N_{13} = (n_d + n_m) \cdot l_3 = (150\,000 + 1\,010\,000) \cdot 16 = 18\,560\,000 \text{ Kč} \quad (4.46)$$

Vzhledem k náročnosti rekonstrukce vedení, při které mimo výměny vodiče dochází i k nahrazení velké části podpěrných bodů, jsem tuto investici rozdělil do dvou let, na 6 500 tis. Kč v prvním roce a zbylých 12 060 tis. Kč v druhém roce. Provozní náklady budou nulové ( $N_{p3} = 0$ ), protože míra údržby a tomu odpovídající cena údržby vedení nezávisí na průřezu vodiče.

Varianta 3 je schopna plně zajistit zásobování průmyslové zóny ve všech etapách rozvoje. Proto bude v této variantě dosaženo nejvyšších výnosů jak jednorázových, tak pravidelných.

Tab. 4.XX Výsledky výpočtu výnosů pro variantu 3

Rok	$P_{\text{rez}}$ (MW)	$P_{\text{max}}$ (MW)	A (MWh)	$V_p$ (tis. Kč)	$V_j$ (tis. Kč)
2019	2,7	1,7	9 694,08	4 149,75	
2020	2,7	2,2	12 545,28	5 531,37	
2021	7,7	3,7	21 098,88	9 581,84	4 000,00
2022	7,7	3,7	21 098,88	9 869,29	
2023	7,7	5,7	32 503,68	15 660,16	
2024	7,7	6,3	35 925,12	17 827,86	
2025	15,7	8,7	49 610,88	25 358,01	6 400,00
2026	15,7	10,3	58 734,72	30 922,20	
2027	15,7	12,9	73 560,96	39 889,64	
2028	20,7	14,4	82 114,56	45 863,80	4 000,00
2029	20,7	14,4	82 114,56	47 239,72	
2030	20,7	15,4	87 816,96	52 035,86	
2031	20,7	17,0	96 940,80	59 165,45	
2032	24,1	18,1	103 213,44	64 883,62	2 700,00
2033	24,1	18,1	103 213,44	66 830,13	
2034	24,1	18,7	106 634,88	71 116,85	
2035	24,1	19,8	112 907,52	77 559,20	

Dle výsledku výpočtu ekonomického modelu v tabulkovém kalkulátoru je čistá současná hodnota investice 326 253,20 tis. Kč.

#### 4.2.3.4 Varianta 4

Měrné náklady na demontáž stávajícího vedení stále činí 150 tis. Kč · km<sup>-1</sup>. Zdvojení vedení vyžaduje oproti předchozí variantě kompletní výměnu podpěrných bodů a dvojnásobné náklady na montáž vodiče, což se pochopitelně projeví v hodnotě investice. Instalované dvojité vedení bude na příhradových ocelových stožárech. Toto provedení venkovního vedení vyžaduje investici ve výši 2 699 tis. Kč · km<sup>-1</sup>. Rekonstruovaný úsek má celkovou délku 15 km. První kilometr tohoto vedení bude opatřen výběhovým zemnicím lanem a bude nákladnější (2 838 tis. Kč · km<sup>-1</sup>). Při znalosti všech potřebných hodnot mohou nyní vypočítat celkový vynaložený finanční obnos.

$$\begin{aligned}
 N_{i4} &= n_d \cdot l_{4\text{celk}} + n_m \cdot l_4 + n_{mZL} \cdot l_{4ZL} = \\
 &= 150\,000 \cdot 15 + 2\,699\,000 \cdot 14 + 2\,838\,000 \cdot 1 = 42\,874\,000 \text{ Kč}
 \end{aligned}
 \tag{4.47}$$

Realizace úprav v této variantě je ještě o něco náročnější, než při rekonstrukci jednoduchého vedení, a proto zde také rozdělím investici do dvou let. V prvním roce provozovatel distribuční soustavy vynaloží 16 000 tis. Kč a v druhém pak 26 874 tis. Kč. Díky zdvojení vedení tato varianta již obnáší provozní náklady. Ty dosahují roční výše 18 tis. Kč · km<sup>-1</sup>. Pro celý úsek zrekonstruovaného vedení budou roční provozní náklady:

$$N_{p4} = n_p \cdot l_4 = 18\,000 \cdot 15 = 270\,000 \text{ Kč} \tag{4.48}$$

Tato varianta je stejně jako varianta 4 schopna pokrýt všechny požadavky na navyšování rezervovaného příkonu v průmyslové zóně. Proto jsou výnosy obou variant shodné.

Tab. 4.XXI Výsledky výpočtu výnosů pro variantu 4

Rok	$P_{\text{rez}}$ (MW)	$P_{\text{max}}$ (MW)	A (MWh)	$V_p$ (tis. Kč)	$V_j$ (tis. Kč)
2019	2,7	1,7	9 694,08	4 149,75	
2020	2,7	2,2	12 545,28	5 531,37	
2021	7,7	3,7	21 098,88	9 581,84	4 000,00
2022	7,7	3,7	21 098,88	9 869,29	
2023	7,7	5,7	32 503,68	15 660,16	
2024	7,7	6,3	35 925,12	17 827,86	
2025	15,7	8,7	49 610,88	25 358,01	6 400,00
2026	15,7	10,3	58 734,72	30 922,20	
2027	15,7	12,9	73 560,96	39 889,64	
2028	20,7	14,4	82 114,56	45 863,80	4 000,00
2029	20,7	14,4	82 114,56	47 239,72	
2030	20,7	15,4	87 816,96	52 035,86	
2031	20,7	17,0	96 940,80	59 165,45	
2032	24,1	18,1	103 213,44	64 883,62	2 700,00
2033	24,1	18,1	103 213,44	66 830,13	
2034	24,1	18,7	106 634,88	71 116,85	
2035	24,1	19,8	112 907,52	77 559,20	

Provedením výpočtu čisté současné hodnoty investice jsem získal výsledek 311 024,40 tis. Kč.



#### 4.2.3.5 Varianta 5

Náklady v této variantě jsou téměř shodné s variantou 4, protože zde dochází k totožné rekonstrukci (zdvojení) vedení. Investice se zde liší pouze v provedení drobné úpravy distribuční soustavy, která má za cíl umožnit změnu konfigurace sítě. Proto navýším investiční náklady v prvním roce o 1 000 tis. Kč na výsledných 17 000 tis. Kč. Investici v druhém roce ponechám ve výši 26 874 tis. Kč.

$$N_{15} = N_{14} + 1\,000\,000 = 42\,874\,000 + 1\,000\,000 = 43\,874\,000 \text{ Kč} \quad (4.49)$$

Roční provozní náklady budou stejně vysoké jako v předchozí variantě ( $N_{p5} = 270$  tis. Kč).

Výnosy u této poslední varianty jsou stejně jako u předcházejících dvou variant nejvyšší možné a odvíjí se od uspokojených požadavků odběratelů.

Tab. 4.XXII Výsledky výpočtu výnosů pro variantu 5

Rok	$P_{rez}$ (MW)	$P_{max}$ (MW)	A (MWh)	$V_p$ (tis. Kč)	$V_j$ (tis. Kč)
2019	2,7	1,7	9 694,08	4 149,75	
2020	2,7	2,2	12 545,28	5 531,37	
2021	7,7	3,7	21 098,88	9 581,84	4 000,00
2022	7,7	3,7	21 098,88	9 869,29	
2023	7,7	5,7	32 503,68	15 660,16	
2024	7,7	6,3	35 925,12	17 827,86	
2025	15,7	8,7	49 610,88	25 358,01	6 400,00
2026	15,7	10,3	58 734,72	30 922,20	
2027	15,7	12,9	73 560,96	39 889,64	
2028	20,7	14,4	82 114,56	45 863,80	4 000,00
2029	20,7	14,4	82 114,56	47 239,72	
2030	20,7	15,4	87 816,96	52 035,86	
2031	20,7	17,0	96 940,80	59 165,45	
2032	24,1	18,1	103 213,44	64 883,62	2 700,00
2033	24,1	18,1	103 213,44	66 830,13	
2034	24,1	18,7	106 634,88	71 116,85	
2035	24,1	19,8	112 907,52	77 559,20	

Výstupem z modelu, který jsem použil ke stanovení čisté současné hodnoty investice, je částka 310 518,03 tis. Kč.

### 4.3 Volba optimální varianty

Na základě provedených výpočtů mohu zvolit optimální variantu, tj. tu variantu, která splňuje požadavky a zároveň je z ekonomického hlediska nejefektivnější. Jediným požadavkem, který je na varianty kladen, je dodržení napěťového limitu 19,8 kV pro dokončenou a plně využívanou průmyslovou zónu s rezervovaným příkonem 24,1 MW. S ohledem na toto kritérium se výběr zužuje na varianty 3, 4 a 5. Ekonomické hodnocení ukázalo, že nejvyšší čisté současné hodnoty dosahuje varianta 3. Na výběr mohou mít také vliv doplňující výhody jednotlivých variant. U varianty 3 je touto výhodou rychlejší správní řízení při tvorbě projektu oproti variantám 4 a 5, protože tato varianta vyžaduje pouze výměnu jednoduchého vedení za nové jednoduché vedení (oproti výměně za dvojité vedení ve variantách 4 a 5). Varianta 5 nabízí nad rámec požadavků oddělení odběrů v průmyslové zóně od okolní sítě VN, a tím omezit šíření jevů negativně ovlivňujících kvalitu napětí.

Tab. 4.XXIII Porovnání jednotlivých variant

Varianta	1	2	3	4	5
$U_{\min}$ (kV)	< 19,8	< 19,8	20,0	20,0	20,8
NPV (tis. Kč)	163 450	323 691	326 253	311 024	310 518
Doplň. výhody	ne	ne	ano	ne	ano

Důležitým faktorem při výběru varianty je skutečnost, že nejpozději v roce 2026 bude výchozí stav zásobování průmyslové zóny realizován z nové transformovny. Zvolená varianta tak bude v budoucnu sloužit k záložnímu napájení průmyslové zóny pouze v případě výpadku provozu této transformovny, jenž bude mít s nejvyšší pravděpodobností krátkodobý charakter. Díky nízkému využití zvolené varianty ztrácí význam výhoda v podobě oddělení odběrů, a proto jsem se rozhodl vybrat jako optimální variantu zásobování průmyslové zóny variantu 3.

## 5 Výpočet zkratových poměrů

V této kapitole provedu výpočet třífázového symetrického zkratového proudu a výkonu v místě připojení průmyslové zóny k distribuční soustavě, tj. na napěťové hladině 22 kV. Při výpočtu, který budu provádět ve fyzikálních jednotkách, budu uvažovat jmenovité převody. Zkratová impedance bude tvořena imaginární i reálnou složkou. Cílem výpočtu je určení zkratových poměrů pro stávající způsob zásobování (variantu 1), pro přechodný způsob zásobování pomocí optimální varianty 3 a pro finální řešení napájení, které bude zajišťováno novou transformovnou.

Jelikož neznám parametry transformátoru 110/23 kV, který bude instalován do nové transformovny, použiji pro veškeré zkratové výpočty parametry transformátoru, který je v současnosti provozován v transformovně Bělá.

$$p = \frac{110}{23} \text{ kV}$$

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

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

$$\Delta P_k = 170 \text{ kW}$$

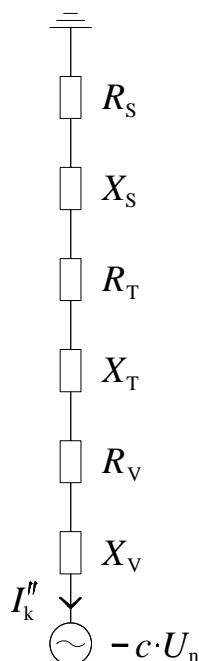
Pro zkratový výpočet je nutné znát velikosti prvků náhradního schématu tohoto transformátoru.

$$Z_T = \frac{u_{k\%}}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_T} \cdot \frac{1}{p^2} = \frac{11,5}{100} \cdot \frac{(110 \cdot 10^3)^2}{40 \cdot 10^6} \cdot \left( \frac{23 \cdot 10^3}{110 \cdot 10^3} \right)^2 = 1\,520,88 \text{ m}\Omega \quad (5.1)$$

$$R_T = \Delta P_k \cdot \frac{U_n^2}{S_T^2} \cdot \frac{1}{p^2} = 170 \cdot 10^3 \cdot \left( \frac{110 \cdot 10^3}{40 \cdot 10^6} \right)^2 \cdot \left( \frac{23 \cdot 10^3}{110 \cdot 10^3} \right)^2 = 56,21 \text{ m}\Omega \quad (5.2)$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} = \sqrt{(1\,520,88 \cdot 10^{-3})^2 - (56,21 \cdot 10^{-3})^2} = 1\,519,84 \text{ m}\Omega \quad (5.3)$$

Náhradní schéma pro výpočet zkratu je shodné pro všechny tři způsoby zásobování průmyslové zóny, proto jej uvedu již zde. Jednotlivé výpočty se budou lišit pouze velikostmi prvků.



Obr. 5.1 Náhradní schéma pro výpočet zkratu

## 5.1 Stávající způsob zásobování

Zkratové poměry na přípojnici rozvodny 110 kV v transformovně Bělá jsou tyto:

$$I_k'' = 7,24 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 1\,386,00 \text{ MVA}$$

Na základě zkratového výkonu stanovím impedanci nadřazené soustavy, samozřejmě již přepočtenou na napětí v místě zkratu. Koeficient  $c$  je pro hladinu VVN a VN roven 1,1.

$$Z_s = \frac{c \cdot U_n^2}{S_k''} \cdot \frac{1}{p^2} = \frac{1,1 \cdot (110 \cdot 10^3)^2}{1\,386,00 \cdot 10^6} \cdot \left( \frac{23 \cdot 10^3}{110 \cdot 10^3} \right)^2 = 419,84 \text{ m}\Omega \quad (5.4)$$

Vzhledem k silně převažující imaginární složce impedance u nadřazené soustavy lze uvažovat, že  $X_s \approx Z_s$ . Velikost rezistance je pak dána jako 10 % z velikosti reaktance. <sup>[13]</sup>

$$R_s = 0,1 \cdot X_s = 0,1 \cdot 419,84 \cdot 10^{-3} = 41,98 \text{ m}\Omega \quad (5.5)$$

Výpočty týkající se transformátoru jsem již provedl výše. Prvky náhradního schématu transformátoru mají následující hodnoty:

$$R_T = 56,21 \text{ m}\Omega$$

$$X_T = 1\,519,84 \text{ m}\Omega$$

Vedení o délce  $l = 15 \text{ km}$  s typem vodiče AlFe 6 240 mm<sup>2</sup> má dle tabulky 4.I tyto parametry:

$$R_p = 0,125 \text{ }\Omega \cdot \text{km}^{-1}$$

$$X_p = 0,400 \text{ }\Omega \cdot \text{km}^{-1}$$

Pak celková rezistance a reaktance vedení bude:

$$R_v = R_p \cdot l = 0,125 \cdot 15 = 1\,875,00 \text{ m}\Omega \quad (5.6)$$

$$X_v = X_p \cdot l = 0,400 \cdot 15 = 6\,000,00 \text{ m}\Omega \quad (5.7)$$

Nyní mám k dispozici velikosti všech prvků náhradního schématu a mohu vypočítat velikost celkové zkratové impedance.

$$\begin{aligned} R_k &= R_s + R_T + R_v = \\ &= 41,98 \cdot 10^{-3} + 56,21 \cdot 10^{-3} + 1\,875,00 \cdot 10^{-3} = 1\,973,19 \text{ m}\Omega \end{aligned} \quad (5.8)$$

$$\begin{aligned} X_k &= X_s + X_T + X_v = \\ &= 419,84 \cdot 10^{-3} + 1\,519,84 \cdot 10^{-3} + 6\,000,00 \cdot 10^{-3} = 7\,939,68 \text{ m}\Omega \end{aligned} \quad (5.9)$$

$$Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_k^2} = \sqrt{(1\,973,19 \cdot 10^{-3})^2 + (7\,939,68 \cdot 10^{-3})^2} = 8\,181,20 \text{ m}\Omega \quad (5.10)$$

Velikost počátečního rázového zkratového proudu bude:

$$I_k'' = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_k} = \frac{1,1 \cdot 22 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 8\,181,20 \cdot 10^{-3}} = 1,71 \text{ kA} \quad (5.11)$$

Třífázový zkratový výkon vypočítám takto:

$$S_k'' = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_k'' = \sqrt{3} \cdot 22 \cdot 10^3 \cdot 1,71 \cdot 10^3 = 65,16 \text{ MVA} \quad (5.12)$$

## 5.2 Přejídný způsob zásobování (varianta 3)

V tomto případě je průmyslová zóna napájena pomocí dvou vývodů tak, že někteří odběratelé budou zásobováni z transformovny Bělá vývodem Tachov a ostatní vývodem Bor.

### 5.2.1 Zásobování pomocí vývodu Tachov

Provedení napájení je totožné se stávajícím stavem, jehož zkratové poměry jsem vypočítal v kapitole 5.1. Po realizaci zásobování průmyslové zóny dle varianty 3, se proto zkratové poměry u odběratelů, kteří budou nadále zásobováni pomocí vývodu Tachov, v přípojném místě nezmění.

$$I_k'' = 1,71 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 65,16 \text{ MVA}$$

### 5.2.2 Zásobování pomocí vývodu Bor

Vzhledem k tomu, že je zásobování průmyslové zóny stále zajišťováno transformovnou Bělá, parametry prvků náhradního schématu zůstávají pro nadřazenou soustavu a transformátor, oproti výpočtům v kapitole 5.1, nezměněny.

$$R_s = 41,98 \text{ m}\Omega$$

$$X_s = 419,84 \text{ m}\Omega$$

$$R_T = 56,21 \text{ m}\Omega$$

$$X_T = 1519,84 \text{ m}\Omega$$

Instalované vedení o délce  $l = 13 \text{ km}$  s typem vodiče AlFe 110/22 mm<sup>2</sup> má dle tabulky 4.1 tyto parametry:

$$R_p = 0,266 \text{ }\Omega \cdot \text{km}^{-1}$$

$$X_p = 0,421 \text{ }\Omega \cdot \text{km}^{-1}$$

Pak celková rezistance a reaktance vedení bude:

$$R_v = R_p \cdot l = 0,266 \cdot 13 = 3\,458,00 \text{ m}\Omega \quad (5.13)$$

$$X_v = X_p \cdot l = 0,421 \cdot 13 = 5\,473,00 \text{ m}\Omega \quad (5.14)$$

Nyní mám k dispozici velikosti všech prvků náhradního schématu a mohu vypočítat velikost celkové zkratové impedance.

$$\begin{aligned} R_k &= R_s + R_T + R_v = \\ &= 41,98 \cdot 10^{-3} + 56,21 \cdot 10^{-3} + 3\,458,00 \cdot 10^{-3} = 3\,556,19 \text{ m}\Omega \end{aligned} \quad (5.15)$$

$$\begin{aligned} X_k &= X_s + X_T + X_v = \\ &= 419,84 \cdot 10^{-3} + 1\,519,84 \cdot 10^{-3} + 5\,473,00 \cdot 10^{-3} = 7\,412,68 \text{ m}\Omega \end{aligned} \quad (5.16)$$

$$Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_k^2} = \sqrt{(3\,556,19 \cdot 10^{-3})^2 + (7\,412,68 \cdot 10^{-3})^2} = 8\,221,58 \text{ m}\Omega \quad (5.17)$$

Velikost počátečního rázového zkratového proudu bude:

$$I_k'' = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_k} = \frac{1,1 \cdot 22 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 8\,221,58 \cdot 10^{-3}} = 1,70 \text{ kA} \quad (5.18)$$

Třífázový zkratový výkon vypočítám pomocí následujícího výrazu:

$$S_k'' = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_k'' = \sqrt{3} \cdot 22 \cdot 10^3 \cdot 1,70 \cdot 10^3 = 64,78 \text{ MVA} \quad (5.19)$$

### 5.3 Finální způsob zásobování (nová transformovna)

V tomto případě je průmyslová zóna zásobována dvěma vývody nové transformovny, které slouží výhradně tomuto účelu. Zkratové poměry budou na konci každého z těchto vývodů prakticky shodné, proto pro ně provedu společný výpočet. Obdržel jsem

předpokládanou hodnotu třífázového symetrického zkratového proudu a výkonu při zkratu na přípojnici rozvodny 110 kV v nové transformovně.

$$I_k'' = 4,59 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 874,59 \text{ MVA}$$

Ze zkratového výkonu určím impedanci nadřazené soustavy vztaženou k napětí 22 kV.

$$Z_S = \frac{c \cdot U_n^2}{S_k''} \cdot \frac{1}{p^2} = \frac{1,1 \cdot (110 \cdot 10^3)^2}{874,59 \cdot 10^6} \cdot \left( \frac{23 \cdot 10^3}{110 \cdot 10^3} \right)^2 = 608,74 \text{ m}\Omega \quad (5.20)$$

I zde platí, že u nadřazené soustavy reaktance výrazně převyšuje rezistanci, a proto  $X_S \approx Z_S$ . Hodnota rezistance je 10 % z velikosti reaktance.

$$R_S = 0,1 \cdot X_S = 0,1 \cdot 608,74 \cdot 10^{-3} = 60,87 \text{ m}\Omega \quad (5.21)$$

Prvky náhradního schématu instalovaného transformátoru mají hodnoty:

$$R_T = 56,21 \text{ m}\Omega$$

$$X_T = 1519,84 \text{ m}\Omega$$

Vedení, které bude distribuovat elektřinu do průmyslové zóny, bude s nejvyšší pravděpodobností kabelového provedení. Dle metodiky týkající se koncepce elektrických stanic VVN a VN bude počáteční úsek vývodů tvořen kabelem AXEKVCEY 240 mm<sup>2</sup>. Vzhledem k malé vzdálenosti průmyslové zóny od transformovny uvažují tento typ kabelu po celé délce obou vývodů. Jelikož neznám přesné trasy, kterými budou kabely pokládány, zvolím pro oba vývody stejnou délku  $l = 2$  km. Zmíněný typ kabelu má tyto parametry:

$$R_p = 0,125 \text{ }\Omega \cdot \text{km}^{-1}$$

$$X_p = 0,113 \text{ }\Omega \cdot \text{km}^{-1}$$

Celková rezistance a reaktance kabelu bude:

$$R_v = R_p \cdot l = 0,125 \cdot 2 = 250,00 \text{ m}\Omega \quad (5.22)$$

$$X_v = X_p \cdot l = 0,113 \cdot 2 = 226,00 \text{ m}\Omega \quad (5.23)$$



Nyní mohu vypočítat velikost celkové zkratové impedance.

$$\begin{aligned} R_k &= R_s + R_T + R_V = \\ &= 60,87 \cdot 10^{-3} + 56,21 \cdot 10^{-3} + 250,00 \cdot 10^{-3} = 367,08 \text{ m}\Omega \end{aligned} \quad (5.24)$$

$$\begin{aligned} X_k &= X_s + X_T + X_V = \\ &= 608,74 \cdot 10^{-3} + 1\,519,84 \cdot 10^{-3} + 226,00 \cdot 10^{-3} = 2\,354,58 \text{ m}\Omega \end{aligned} \quad (5.25)$$

$$Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_k^2} = \sqrt{(367,08 \cdot 10^{-3})^2 + (2\,354,58 \cdot 10^{-3})^2} = 2\,383,02 \text{ m}\Omega \quad (5.26)$$

Velikost počátečního rázového zkratového proudu a zkratového výkonu bude:

$$I_k'' = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_k} = \frac{1,1 \cdot 22 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 2\,383,02 \cdot 10^{-3}} = 5,86 \text{ kA} \quad (5.27)$$

$$S_k'' = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_k'' = \sqrt{3} \cdot 22 \cdot 10^3 \cdot 1,71 \cdot 10^3 = 223,41 \text{ MVA} \quad (5.28)$$

## 5.4 Srovnání výsledků

Při stávajícím a přechodném způsobu zásobování průmyslové zóny dosahují počáteční rázové zkratové proudy při třífázovém zkratu na přípojce hodnot 1,71 kA, resp. 1,71 kA a 1,70 kA (zásobování je zajišťováno dvěma vývody). Zkratové poměry jsou prakticky shodné díky společné napájecí transformovně a podobným délkám vedení k průmyslové zóně. S výstavbou nové transformovny vzroste hodnota zkratového proudu v téměř místě na 5,86 kA. Vzhledem k umístění nové transformovny, která se bude nacházet v těsné blízkosti průmyslové zóny, jsem očekával vyšší zkratový proud. Není tomu tak, protože se nová distribuční transformovna bude z hlediska impedance nacházet uprostřed smyčky sítě 110 kV, a je tedy elektricky velmi vzdálená od uzlové stanice ZVN/VVN.

Tab. 5.1 Porovnání zkratových poměrů pro tři způsoby zásobování průmyslové zóny

Způsob zásobování	$I_k''$ (kA)	$S_k''$ (MVA)
stávající	1,71	65,16
přechodný (varianta 3)	1,71/1,70	65,16/64,78
finální (nová transformovna)	5,86	223,41

## Závěr

Z charakteristiky řešené průmyslové zóny jsem vyzoroval, že zóna je na úplném počátku rozvoje. Dosud využíváno je pouze 16 % z celkové rozlohy. Provozovatel distribuční soustavy zatím neobdržel větší množství žádostí o připojení nových odběratelů. Proto jsem měl k dispozici pouze předpokládaný nárůst rezervovaného výkonu v několika etapách. Očekávanou hodnotu rezervovaného příkonu, který bude v dokončené průmyslové zóně odebírán, jsem musel vypočítat na základě znalosti poměrů v jiné zóně s obdobnou skladbou funkcí. Takto jsem dospěl k hodnotě 24,1 MW. Analýza stávajícího stavu distribuční soustavy v této oblasti ukázala, že pro tak vysokou hodnotu rezervovaného příkonu nedisponuje provozovatel distribuční soustavy potřebnou transformační kapacitou VVN/VN.

Jediným přijatelným řešením tohoto problému se stala výstavba nové transformovny v blízkosti průmyslové zóny. Na základě obecně známých požadavků na umístění transformovny jsem zvolil vhodnou lokalitu, kterou je možné zhlédnout na obrázku 3.1. Pomocí závazné metodiky provozovatele distribuční soustavy jsem novou transformovnu slovně charakterizoval. Nechybí zde ani důležité číselné parametry. Mezi ně nepochybně patří výkon instalovaného transformátoru, který bude mít hodnotu 40 MVA. Výstavbu nové transformovny jsem označil jako finální řešení, protože po jejím dokončení, nejpozději v roce 2026, se tato transformovna stane výchozím způsobem zásobování průmyslové zóny.

Kvůli požadavku na spolehlivost dodávky ovšem musí být v souběhu s výstavbou transformovny realizována další investice, která bude schopna zajistit napájení průmyslové zóny v případě úplného výpadku nové transformovny. Pro náhradní způsob zásobování se jako nejvhodnější jeví transformovna Bělá, která průmyslovou zónu zásobuje v současnosti. Stávající zapojení sítě VN, při kterém je pro napájení zóny využíván vývod Tachov, vyhovuje z hlediska napěťových poměrů pouze do roku 2024. Navrhl jsem proto další čtyři varianty zásobování. Pro všechny jsem provedl výpočty nejnižších hodnot napětí v síti. Dovolené meze odchylek od jmenovité hodnoty napětí dosáhly pro nejvyšší očekávaný odběr v průmyslové zóně pouze tři z těchto variant.

Pro stanovení optimální varianty jsem uplatnil ekonomické hledisko. Vypočítal jsem výnosy a náklady pro jednotlivé varianty a za užití výpočetního modelu jsem určil jejich čisté současné hodnoty. Nejvyšší hodnoty dosáhla varianta 3, která při splnění všech technických požadavků vyžadovala nízké investiční náklady. Jedinými technickými úpravami distribuční soustavy jsou v tomto případě navýšení průřezu vodiče na úseku vedení o délce 16 km a beznákladová manipulace spínacích prvků na vedení. Tímto jsem definoval přechodný způsob zásobování, jeho podrobnější charakteristika je patrná z obrázku 4.3.

Vzhledem k tomu, že jsou již popsány všechny tři způsoby zásobování průmyslové zóny, provedl jsem výpočet třífázového zkratového proudu a výkonu v místě připojení průmyslové zóny k distribuční soustavě pro každý z nich. Výsledky výpočtů jsou vyjádřeny v tabulce 5.I. Zkratové poměry pro stávající a přechodný způsob zásobování jsou prakticky identické. V případě finálního způsobu zásobování zkratový proud vzroste, protože se nová transformovna nachází pouhé 2 km od středu průmyslové zóny, a zkratová impedance vedení je tedy výrazně nižší. Zajímavým zjištěním je, že oproti sousedním transformovnám s obvyklou hodnotou  $I_k'' \approx 8 \text{ kA}$ , je počáteční rázový zkratový proud na přípojnici VVN nové transformovny pouze 4,59 kA.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] GAZDÍK, Roman. *Století elektřiny: Spotřeba elektřiny v Česku stoupla za sto let 74krát*. Tisková zpráva, Skupina ČEZ. [online]. 11.7.2018 [cit. 4.12.2018]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/pro-media/tiskove-zpravy/6502.html>
- [2] Zákon č. 458/2000 Sb. ze dne 28. listopadu 2000, o podmínkách podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích a o změně některých zákonů (energetický zákon), ve znění účinném k 1.1.2018.
- [3] ERÚ. *Energetický regulační věstník: částka 10/2018*. Jihlava, 2018.
- [4] ERÚ. *Energetický regulační věstník: částka 11/2018*. Jihlava, 2018.
- [5] Vyhláška č. 16/2016 Sb. ze dne 13. ledna 2016, o podmínkách připojení k elektrizační soustavě.
- [6] PROVOZOVATELÉ DISTRIBUČNÍCH SOUSTAV. *Pravidla provozování distribučních soustav: Příloha 6 - Standardy připojení zařízení k distribuční soustavě*. Praha, 2017.
- [7] GEODIS. *Mapový server, Centrum pro regionální rozvoj České republiky*. Podkladová data map. [online]. [cit. 26.11.2018]. Dostupné z: <http://mapy.crr.cz/>
- [8] ČEZ Distribuce, a. s. Interní datové podklady.
- [9] ČSN EN 50160 ed. 3. *Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejných distribučních sítí*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [10] MERTLOVÁ, Jiřina a NOHÁČOVÁ, Lucie. *Elektrické stanice a vedení*. 1. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2008. 168 s. ISBN 978-80-7043-724-7.
- [11] *Volná transformační kapacita na distribučních transformátorech 110 kV/vn ČEZ Distribuce, a. s.* [online]. [cit. 21.2.2019]. Dostupné z: [https://www.cezdistribuce.cz/edee/content/file-other/distribuce/distribucni\\_soustava/volna-distribucni-kapacita-2019-transformatory-oblast-zapad.pdf](https://www.cezdistribuce.cz/edee/content/file-other/distribuce/distribucni_soustava/volna-distribucni-kapacita-2019-transformatory-oblast-zapad.pdf)
- [12] Atelier T-plan, s.r.o. *Územní plán Bor*. Praha, 2010.
- [13] TESAŘOVÁ, Miloslava a ŠTROBLOVÁ, Milada. *Průmyslová elektroenergetika*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000. 154 s. ISBN 80-7082-703-3.
- [14] *Výstavba nového vedení trvá často roky*. Článek. [online]. 20.7.2011 [cit. 3.3.2019]. Dostupné z: <http://www.dvs.cz/clanek.asp?id=6497170>
- [15] SCHEJBAL, Konstantin a MERTLOVÁ, Jiřina. *Elektroenergetika II. 1.část*. 1. vyd. Plzeň: ZČU, 1998. 124 s. ISBN 80-7082-451-4.

## Přílohy

**Příloha A - Příklad provedení tabulkového kalkulátoru pro výpočet napěťových poměrů v kapitole 4.1. Zde pro variantu 3.**

Varianta 3										
Úsek	Typ vodiče	Délka (km)	R ( $\Omega$ )	X ( $\Omega$ )	P (kW)	Q (kVAr)	I <sub>č</sub> (A)	I <sub>j</sub> (A)	$\Delta U$ (V)	
1	AlFe 6_240	15	1,875	6,000	15200	3086,49	398,90	81,00	2137,24	
2	AlFe 6_70	4	1,728	1,724	2500	507,65	65,61	13,32	236,14	
3	AlFe 6_70	10	4,320	4,310	2000	406,12	52,49	10,66	472,33	
4	AlFe 6_70	3	1,296	1,293	1200	243,67	31,49	6,39	85,00	
5	SAX_70	9	3,987	1,242	200	40,61	5,25	1,07	38,56	2969,27
										20030,73
Úsek	Typ vodiče	Délka (km)	R ( $\Omega$ )	X ( $\Omega$ )	P (kW)	Q (kVAr)	I <sub>č</sub> (A)	I <sub>j</sub> (A)	$\Delta U$ (V)	
1	AlFe 110/22	10	2,660	4,210	13600	2761,60	356,91	72,47	2172,82	
2	AlFe 110/22	3	0,798	1,263	12600	2558,54	330,66	67,14	603,90	
3	AlFe 110/22	3	0,798	1,263	1200	243,67	31,49	6,39	57,50	
4	AlFe 6_70	6	2,592	2,586	200	40,61	5,25	1,07	28,36	2862,58
										20137,42

**Příloha B - Příklad provedení tabulkového kalkulátoru pro výpočet výnosů, které jsou součástí ekonomického hodnocení v kapitole 4.2. Zde pro variantu 3, 4, resp. 5.**

Rok	Prez (MW)	Pmax (MW)	A (MWh)	Roční cena za kapacitu (tis. Kč/MW)	Použití sítě (tis. Kč/MWh)	Tržby (tis. Kč)
2019	2,7	1,7	9694,08	174,5410000	0,06077000	4149,75
2020	2,7	2,2	12545,28	179,7772300	0,06259310	5531,37
2021	7,7	3,7	21098,88	185,1705469	0,06447089	9581,84
2022	7,7	3,7	21098,88	190,7256633	0,06640502	9869,29
2023	7,7	5,7	32503,68	196,4474332	0,06839717	15660,16
2024	7,7	6,3	35925,12	202,3408562	0,07044909	17827,86
2025	15,7	8,7	49610,88	208,4110819	0,07256256	25358,01
2026	15,7	10,3	58734,72	214,6634143	0,07473943	30922,20
2027	15,7	12,9	73560,96	221,1033168	0,07698162	39889,64
2028	20,7	14,4	82114,56	227,7364163	0,07929107	45863,80
2029	20,7	14,4	82114,56	234,5685088	0,08166980	47239,72
2030	20,7	15,4	87816,96	241,6055640	0,08411989	52035,86
2031	20,7	17	96940,80	248,8537310	0,08664349	59165,45
2032	24,1	18,1	103213,44	256,3193429	0,08924279	64883,62
2033	24,1	18,1	103213,44	264,0089232	0,09192008	66830,13
2034	24,1	18,7	106634,88	271,9291909	0,09467768	71116,85
2035	24,1	19,8	112907,52	280,0870666	0,09751801	77559,20







### Příloha E - Model pro výpočet čisté současné hodnoty investice v kapitole 4.2. Jedná se o výpočet varianty 3.

Vstupy:	Název projektu: Varianta 3																
	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	
Daň z příjmu																	
Inflace	19%																
Distribuční sazba	3%																
Spotřeba	0 TCZK/MWh																
Odporová sazba	4%																
Diskontní sazba	8%																
Počáteční rok projektu	2020																
Upravená o inflaci:	4,85%																
<b>Roky</b>		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
<b>Investiční výdaje</b>																	
TCZK	6 500,000	12 057,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
TCZK	6 500,000	11 498,806	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
<b>Tržby</b>																	
TCZK	5 531,37	13 581,84	9 869,29	15 660,16	17 827,86	17 827,86	31 768,01	30 922,20	39 889,64	49 863,80	47 239,72	52 035,86	59 165,45	67 583,62	66 830,13	71 116,85	77 559,20
TCZK	5 531,37	9 581,84	9 869,29	15 660,16	17 827,86	17 827,86	25 358,01	30 922,2	39 889,64	45 863,8	47 239,72	52 035,86	59 165,45	64 883,62	66 830,13	71 116,85	77 559,20
<b>Tržby mimořádné</b>																	
TCZK	4 000,00	4 000,00	4 000,00	4 000,00	4 000,00	4 000,00	6 400,00	6 400,00	4 000,00	4 000,00	4 000,00	4 000,00	2 700,00	2 700,00	2 700,00	2 700,00	2 700,00
TCZK	260,00	742,28	742,28	742,28	742,28	742,28	742,28	742,28	742,28	742,28	742,28	742,28	742,28	742,28	742,28	742,28	742,28
<b>Odpisy</b>																	
TCZK	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
TCZK	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
TCZK	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Cash Flow projektu</b>																	
diskontované CF	-708,63	2 162,16	9 651,76	14 228,16	15 362,75	15 362,75	25 642,16	23 826,11	29 158,26	34 634,62	31 318,40	32 854,04	35 565,67	38 685,39	36 487,53	37 005,86	38 456,70
TCZK	-708,63	1 453,63	11 105,29	25 333,46	40 696,21	40 696,21	66 338,37	90 164,48	119 322,74	153 957,36	165 275,76	218 129,80	253 695,48	292 380,87	328 868,40	365 874,26	404 330,96
kumulované diskontované CF	-1 759,59	-2 051,98	5 906,98	17 572,83	30 157,69	51 068,87	70 509,05	94 268,28	122 463,36	147 972,29	174 725,10	203 674,33	235 150,53	264 846,46	294 962,24	326 253,20	356 253,20
TCZK	-1 759,59	-2 051,98	5 906,98	17 572,83	30 157,69	51 068,87	70 509,05	94 268,28	122 463,36	147 972,29	174 725,10	203 674,33	235 150,53	264 846,46	294 962,24	326 253,20	356 253,20
diskontované výnosy	5 791,37	13 660,97	9 651,76	14 228,16	15 362,75	15 362,75	25 642,16	23 826,11	29 158,26	34 634,62	31 318,40	32 854,04	35 565,67	38 685,39	36 487,53	37 005,86	38 456,70
TCZK	5 791,37	13 660,97	9 651,76	14 228,16	15 362,75	15 362,75	25 642,16	23 826,11	29 158,26	34 634,62	31 318,40	32 854,04	35 565,67	38 685,39	36 487,53	37 005,86	38 456,70
roky		1															
NPV před zdaněním																	
404 330,96																	
<b>Výsledná NPV projektu (TCZK)</b>																	
<b>326 253,20</b>																	



